

На правах рукописи

БОРОДУЛИН БОРИС БОРИСОВИЧ



**АЛГОРИТМЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРОЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара 2023 г.

Работа выполнена на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Лившиц Михаил Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты: **Ненарокомов Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Космические системы и ракетостроение»

Першин Иван Митрофанович, доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшего профессионального образования, Пятигорский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», профессор кафедры систем управления и информационных технологий

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита состоится «13» декабря 2023 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу: <http://d21221707.samgtu.ru/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), тел.: (846) 278-44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Учёный секретарь Диссертационного совета
24.2.377.04 (Д 212.217.07),
к.т.н., доцент



Е.Е. Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Автономные объекты (АО) находят широкое применение в различных областях: в авиационно-космической отрасли, подводных исследованиях, автомобильном транспорте и т.д. К АО будем относить безэкипажные подводные и надводные аппараты; дроны и другие беспилотные летательные аппараты и т.п. Наиболее представительный класс АО-космические аппараты (КА). Эффективность функционирования АО вообще и КА в особенности в значительной степени зависит от качества и достоверности информации, полученной их бортовой информационно-измерительной системой (ИИС), которая содержит кроме полезного сигнала, различные виды помех, вызывающих искажение информации. Существенную часть погрешности измерений составляет температурная погрешность из-за термодформации несущих конструкций (НК), на которых размещена тепловыделяющая контрольно-измерительная аппаратура. Эту погрешность совместно с тепловым воздействием внешней среды порождает нестационарный неравномерный и случайный характер тепловыделений аппаратуры в ходе ее работы. Особенно большую погрешность термодформация вносит в показания оптических измерительных систем (ОС), так как незначительное термодформационное смещение условной оптической оси ведет к существенным погрешностям в показаниях приборов в случае характерного для КА значительного удаления от объекта измерения. Кроме того, термодформационная погрешность ИИС может привести к недопустимым ошибкам в определении собственного местоположения и курса АО, что в ряде случаев приводит к тяжелым авариям и катастрофам. Поэтому для обеспечения достоверности информации бортовой ИИС актуальной задачей является минимизация или стабилизация в допустимых пределах термодформационной составляющей погрешности контрольно-измерительной аппаратуры с помощью автоматического управления температурой несущей конструкции.

Степень разработанности темы исследования. Проблемы моделирования тепловых процессов глубоко исследованы в фундаментальных работах Г. Карслоу, А.В. Лыкова, М.М. Лаврентьева, Г.Н. Дульнева, Э.М. Карташова, А.А. Гухмана, С.С. Кутателадзе, P.J. Schneider, E.R.G. Eckert, В.С. Зарубина и других. Вопросам численного решения задач теплопроводности посвящены труды А.А. Самарского, Б.М. Будака, П.Н. Вабищевича, Р. Рихтмайера, В. Вазова, Дж. Форсайта, L.I. Segerlind, О. Зенкевича и других. Проблемы тепловых моделей в различных областях науки и техники и обратных задач теплопроводности, которые могут рассматриваться в определенном смысле, как задачи управления им и задачи идентификации исследованы в трудах О.М. Алифанова, С.В. Резника, Ю.М. Мацевитого, А.В. Ненарокова, Л.А. Коздобы, П.В. Просунцова, В.С. Авдучевского, I.V. Vesek, Г.Н. Дульнева, Г.В. Кузнецова и других. Вопросы управления тепловыми процессами подробно исследованы в трудах А.Г. Бутковского, Т.К. Сиразетдинова, Э.Я. Рапопорта, В.Я. Ротача, А.М. Цирлина, Ю.В. Егорова, А.И. Егорова, И.М. Першина, С.Е. Дугина, S.W. Chi и других. В области информационно-измерительных систем и систем управления космическими аппаратами, включая управление тепловым режимом космических аппаратов широко известны труды Б.Н. Петрова, В.П. Легостаева, Е.А. Микрина, В.В. Малоземова, А.Г. Викулова, В.С. Финченко, Л.В. Быкова, С.В. Цапина, П.К. Кузнецова, Г.П. Аншакова, Я.А. Мостового, R. Schmidt, E. Gustavson, O. Akira и других. Проблемам автоматического управления температурой несущих конструкций автономных объектов для снижения термоградиентной компоненты погрешностей посвящены работы Я.М. Клебанова, А.Н. Давыдова, М.Ю. Лившица и А.Н. Козлова, однако в них рассматривались отдельные аспекты этой проблемы, в частности не рассмотрены вопросы оптимального управления температурой несущей конструкции космического аппарата.

Целью диссертационной работы является автоматическое управление температурными режимами несущей конструкции автономного объекта для повышения достоверности информации размещенных на ней бортовых информационно – измерительных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд научно-технических задач:

Проанализировать современное состояние автоматического управления процессами управления температурой НК ИИС АО;

Разработать функционально-ориентированную математическую модель (ФОМ)

температурного поля в НК ИИС АО как объекта управления (ОУ) с распределенными параметрами;

Разработать структуру подсистемы управления температурой НК ИИС КА в составе системы обеспечения температурного режима (СОТР);

Разработать локальные системы автоматического управления (САУ) температурой в контрольных точках НК ИИС АО;

Разработать алгоритмы автоматической термоградиентной стабилизации температуры (АТСТ) НК ИИС КА в СОТР;

Обосновать, поставить и решить для ответственных за термоградиентную компоненту погрешности ИИС КА сечений НК минимаксную задачу оптимального управления с подвижным правым концом траектории в негладкой области допустимых температурных состояний.

Научная новизна полученных результатов:

1. Разработана функционально-ориентированная математическая модель температуры в теплонагруженной несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта, отличающиеся от известных передаточными функциями распределенного объекта управления с учетом размеров областей распределения теплоисточников и поверхностей теплоприемников.

2. Разработаны алгоритмы автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта в составе СОТР, в отличие от известных обеспечивающие с помощью локальных систем автоматического управления, термоградиентную стабилизацию в условиях изменения режимов теплонагружения конструкции.

3. Получены в ходе имитационного моделирования на конечно-элементной компьютерной модели результаты, позволяющие выявить возможности разработанных алгоритмов в штатных и нештатных режимах использования несущих конструкций информационно-измерительных систем автономного объекта, включая нерасчетные режимы работы.

4. Постановлена и решена минимаксная задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции с подвижным правым концом температурной траектории в негладкой области конечных состояний, отличающаяся от известных формулировкой определяющих уравнений альтернансного метода для вычисления управления мощностью дискретно распределенных по поверхности несущей конструкции теплоисточников, обеспечивающего минимальное равномерное отклонение от заданного распределения или максимальное быстродействие.

Теоретическая и практическая значимость. Математические модели температуры в несущих конструкциях информационно-измерительных систем автономного объекта в форме передаточных функций объектов с распределенными параметрами с учетом размеров областей распределения теплоисточников и теплоприемников имеют самостоятельную научно-практическую значимость для разработки теплонагруженных конструкций в аппаратах различного назначения, исследования динамических характеристик температурных полей в этих конструкциях.

Алгоритмы термоградиентной стабилизации могут быть использованы для широкого класса процессов в металлургии и машиностроении для предотвращения трещинообразования в ходе изготовления и доводочных испытаний ответственных изделий.

Результаты синтеза локальных систем автоматического управления температурой несущих конструкций информационно-измерительных систем автономного объекта в силу универсального характера применимы при синтезе систем управления температурой в промышленных процессах технологической теплофизики.

Методика постановки и решения альтернансным методом задачи оптимального управления температурным распределением по линии ответственного за термоградиентную погрешность сечения несущих конструкций информационно-измерительных систем автономного объекта имеет широкие перспективы применения при оптимальном проектировании автономных объектов с минимальными весогабаритными характеристиками СОТР.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи, решены с помощью аналитических и численных методов теории теплопроводности, в т.ч. метода конечных

интегральных преобразований и метода конечных элементов; для синтеза систем управления использованы методы теории систем управления с распределенными параметрами, задачи оптимального управления решены альтернативным методом. Имитационное моделирование производится методами конечных элементов.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (направления п.п. 3, 13).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель температурного поля в неравномерно теплонагруженной несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта, функционально ориентированная на использование в синтезе систем автоматического управления температурой несущей конструкции.

2. Алгоритмы автоматического управления распределением температуры несущей конструкции автономного объекта, обеспечивающие с помощью локальных систем автоматического управления температурой термоградиентную стабилизацию конструкции в условиях изменения режимов теплонагружения.

3. Результаты сравнительного анализа на конечно-элементной компьютерной имитационной модели разработанных алгоритмов и систем автоматического управления температурой несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта.

4. Постановка и решение минимаксной задачи дискретно распределенного оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции с подвижным правым концом температурной траектории в негладкой области конечных состояний.

Степень достоверности и обоснованности диссертационного исследования подтверждается, корректным применением математического аппарата, непротиворечивостью, соответствием фундаментальным физическим законам полученных результатов и совпадением частных результатов моделирования с результатами из независимых источников.

Апробация работы.

Полученные в работе результаты использованы:

при выполнении НИР по проектам Российского фонда фундаментальных исследований:

- проект №17-08-00593, 2017-2019 гг., тема: «Разработка методов автоматического управления процессами тепло- и массопереноса, и оптимального проектирования производственно-технологических комплексов промышленной теплофизики и теплонагруженных конструкций автономных объектов»;

- проект №20-08-00240, 2020-2022г.г., тема: «Разработка методов математического моделирования и управления по системным критериям качества тепло- и массообменными процессами в автономных объектах и технологической теплофизике»;

- при выполнении НИР в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема АААА-А12-2110800012-0)

- в учебном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ»

Основные положения и результаты исследований докладывались на Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики» (Москва-Благовещенск-Космодром «Восточный», 2015 г.), Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (МЭИ, Москва, 2018 г.), XXI международной научной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» ПУМСС (СамГТУ, Самара, 2019 г.), ММТТ-34 (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2021 г).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 научных работ, среди которых 7 статей в изданиях, индексируемых в наукометрической базе SCOPUS; 1 статья в журналах, рекомендованных ВАК; 7 статей в изданиях, индексируемых в РИНЦ.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, состоит в разработке методики моделирования, численных и аналитических математических моделей температурного распределения НК, определении передаточных функций, структуры системы и алгоритма автоматического управления температурным распределением НК, формулировке и методе решения определяющих уравнений в поставленных оптимальных задачах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы изложен на 164 страницах, содержит 81 рисунок, 3 таблицы, список литературы из 136 наименований и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, практическая полезность полученных результатов и основные научные положения, выносимые на защиту, приведены данные по апробации работы.

В первой главе рассмотрены типы и виды АО, отмечено, что КА - наиболее представительный вид АО. Температура в отсеках КА и на НК отклоняется от требуемой под воздействием внешних тепловых возмущений - прямого и отраженного от планет солнечного теплоизлучения, влияния космического вакуума при открывании люков и т.п.; и внутренних – тепловыделения при работе функциональной аппаратуры, размещенной на НК КА. Это приводит к искажению результата измерений. Требуемый тепловой режим КА формируется СОТР. В СОТР КА с целью компенсации неравномерности температурного поля широко используются САУ управляемыми теплоисточниками (УИТ), размещенными на поверхности НК. Однако, они не обеспечивают равномерного температурного распределения в НК КА при глубоких возмущениях. Анализ современного состояния исследований в области моделирования и управления температурой НК ИИС КА показывает, что проблема эффективного снижения термоградиентной составляющей погрешности измерений, особенно оптических, не решена к настоящему времени.

Во второй главе обоснована постановка задачи математического моделирования температурного распределения $T(x, y, z, \tau)$ в теплонагруженной нестационарными тепловыми потоками НК от размещенных на ней приборов ИИС и от внешних тепловых потоков. Для дальнейшего анализа выбрана НК малого КА, с размещенными на ее поверхности тепловыделяющими оптико-электронными приборами ИИС PC1, PC2, Pld1, Pld2, Pa, Pb, Pr1, Pr2, Pr3, Pr4, Pru1, Pru2, Pru3, Pru4, Pp1, Pp2 работающими по различным циклограммам и соответствующими УИТ t_i и t_{iii} , размещенными на поверхности противоположных граней ГР1 и ГР2, управляемыми соответствующей САУ в составе СОТР с целью размерной термоградиентной стабилизации НК. НК (см. рис. 1) представляет собой композитную армированную конструкцию в форме, близкой к прямоугольной призме. В дальнейшем в ходе верификации разработанных на основе математической модели (ММ) ОУ алгоритмов, САУ и для идентификации ФОМ будем использовать уточненную ММ на базе конечно элементной аппроксимации в среде «ANSYS» трехмерной нелинейной краевой задачи распространения тепла в анизотропной композитной НК:

$$c_p(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda(T) \cdot \text{grad}T(x, y, z, \tau)), \quad x \in D_x, \quad y \in D_y, z \in D_z, \tau > 0;$$

$$T(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = T^0(x, y, z, \tau), \quad x \in \bar{D}_x, y \in \bar{D}_y, z \in \bar{D}_z; \quad \Gamma[T(x, y, z, \tau)] = Q(x, y, z, \tau), \quad x \in \partial\bar{D}_x, \\ y \in \partial\bar{D}_y, z \in \partial\bar{D}_z, \tau > 0$$

свободную от большинства принятых в дальнейшем допущений. Здесь Γ – оператор, отражающий теплообмен на гранях Гр1-Гр6 НК, включая тепловыделения УИТ и ИИС, теплопередачу в узлах крепления НК с НК КА, теплообмен излучением, $\bar{D}_x, \bar{D}_y, \bar{D}_z$ – области изменения переменных x, y, z , включая их границу $\partial\bar{D}_x, \partial\bar{D}_y, \partial\bar{D}_z$; Q – внешние воздействия на НК, отражающие нелинейный характер теплообмена с окружающей средой и тепловыделение размещенной на поверхности НК аппаратуры, τ - время.

Для приближенного определения структуры и параметров САУ в линеаризованной ММ ОУ допустимо считать материал НК изотропным, а механические и теплофизические характеристики постоянными и принимать их такими же, как усредненные свойства связующего материала и предположить точечную концентрацию теплоисточников и термодатчиков из за малости их размеров по сравнению с размерами НК а также ввести ряд других обоснованных допущений.

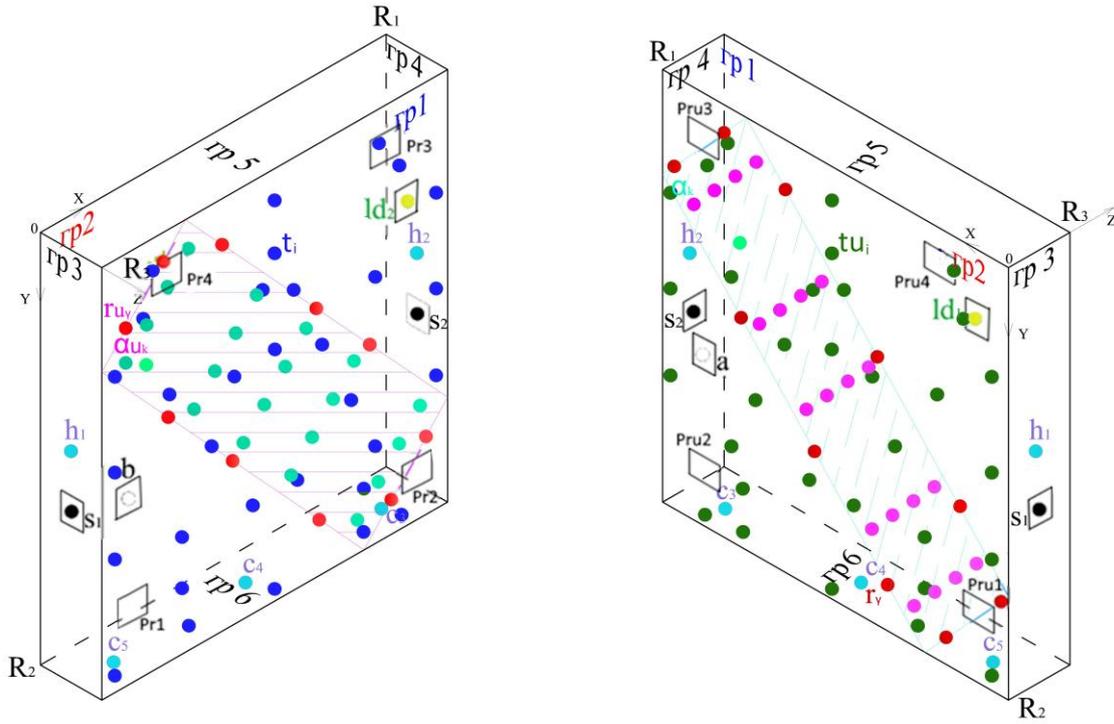


Рисунок 1 - Общая тепловая расчетная схема расположения теплоисточников на НК
 В условиях принятых допущений ММ, описывающая в отклонениях $\theta(x, y, z, \tau) = T(x, y, z, \tau) - T^0$ температурное поле в НК, принимает вид линейной краевой задачи в форме неоднородного уравнения:

$$\frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - a \left[\frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] = \omega(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

и однородных краевых условий:

$$\theta|_{\tau=0} = 0, \quad \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (2)$$

со стандартизирующей функцией:

$$\omega(x, y, z, \tau) = Q_{X_1}(y, z, \tau) \delta(x) + Q_{X_2}(y, z, \tau) \delta(x - R_1) + Q_{Y_1}(x, z, \tau) \delta(y) + Q_{Y_2}(x, z, \tau) \delta(y - R_2) + Q_{Z_1}(x, y, \tau) \delta(z) + Q_{Z_2}(x, y, \tau) \delta(z - R_3) \quad (3)$$

Здесь, $Q_{X_1}(y, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} [q_{X_1}(\tau) + q_{s_1}(\tau)V_{s_1}(y, z) + q_{p_1}(\tau)V_{p_1}(y, z) + q_{h_1}(\tau)V_{h_1}(y, z)]$; $Q_{X_2}(y, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} [q_{X_2}(\tau) + q_{s_2}(\tau)V_{s_2}(y, z) + q_{p_2}(\tau)V_{p_2}(y, z) + q_{h_2}(\tau)V_{h_2}(y, z)]$; $Q_{Y_1}(x, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} q_{Y_1}(\tau)$;
 $Q_{Y_2}(x, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} [q_{Y_2}(\tau) + \sum_{g=1}^3 q_{c_g}(\tau)V_{c_g}(x, z)]$; $Q_{Z_1}(x, y, \tau) = \frac{1}{\lambda} [q_{Z_1}(\tau) + q_{ld_1}(\tau)V_{ld_1}(x, y) + q_a(\tau) \cdot V_a(x, y) + \sum_{\varepsilon \varepsilon=1}^4 q_{Pr_{\varepsilon \varepsilon}}(\tau)V_{Pr_{\varepsilon \varepsilon}}(x, y) + \sum_{i=1}^N q_{t_i}(\tau)V_{t_i}(x, y) + \sum_{k=1}^F q_{\alpha_k}(\tau)V_{\alpha_k}(x, y) + \sum_{\gamma=1}^E q_{r_\gamma}(\tau)V_{r_\gamma}(x, y)]$;
 $Q_{Z_2}(x, y, \tau) = \frac{1}{\lambda} [q_{Z_2}(\tau) + q_{ld_2}(\tau)V_{ld_2}(x, y) + q_b(\tau)V_b(x, y) + \sum_{\varepsilon \varepsilon=1}^4 q_{Pru_{\varepsilon \varepsilon}}(\tau)V_{Pru_{\varepsilon \varepsilon}}(x, y) + \sum_{i=1}^N q_{tu_i}(\tau) \times V_{tu_i}(x, y) + \sum_{k=1}^F q_{au_k}(\tau)V_{au_k}(x, y) + \sum_{\gamma=1}^E q_{ru_\gamma}(\tau)V_{ru_\gamma}(x, y)]$ - обобщенные тепловые потоки на

соответствующие грани, отражающие интенсивность внешнего теплообмена на гранях НК внутри кожуха; $q_{X_1}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_1}^4(\tau) - \theta_{gg_1}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_1} - \theta_{gg_1})$, $x=0$; $q_{X_2}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_2}^4(\tau) - \theta_{gg_2}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_2} - \theta_{gg_2})$, $x=R_1$; $q_{Y_1}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_3}^4(\tau) - \theta_{gg_3}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_3} - \theta_{gg_3})$, $y=0$; $q_{Y_2}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_4}^4(\tau) - \theta_{gg_4}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_4} - \theta_{gg_4})$, $y=R_2$; $q_{Z_1}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_5}^4(\tau) - \theta_{gg_5}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_5} - \theta_{gg_5})$, $z=0$; $q_{Z_2}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_6}^4(\tau) - \theta_{gg_6}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_6} - \theta_{gg_6})$, $z=R_3$, σ_{cm} - постоянная Стефана-Больцмана, ε^* - степень черноты тела, $\theta_{sr_1}(\tau), \theta_{sr_2}(\tau), \theta_{sr_3}(\tau), \theta_{sr_4}(\tau), \theta_{sr_5}(\tau), \theta_{sr_6}(\tau)$ - температуры на внутренних поверхностях внешних ограждений НК, $\theta_{gg_1}(0, y, z, \tau), \theta_{gg_2}(R_1, y, z, \tau), \theta_{gg_3}(x, 0, z, \tau), \theta_{gg_4}(x, R_2, z, \tau), \theta_{gg_5}(x, y, 0, \tau), \theta_{gg_6}(x, y, R_3, \tau)$ - температуры граней НК; $V_{h_i}^*$ - области воздействия тепловых потоков от приборов ИИС, точек крепления НК к КА и УИТ $q_{t_i}(\tau)$ и $q_{tu_i}(\tau)$ на соответствующих гранях НК. Явную форму ОУ представим как решение $\theta(x, y, z, \tau, q_{ti}, q_{tui})$ линейной краевой задачи (1)–(3) в виде комбинации решений частных вспомогательных задач. В силу того, что для рассматриваемой ММ ОУ (1)–(3) управляющие воздействия- $q_{t_i}(\tau), q_{tu_i}(\tau)$ и возмущения представляют собой потоки тепла на гранях НК т.е. формируют граничные условия 2-го рода, решение краевой задачи (1)–(3) представляется суммой температурных полей соответствующих одномерных пластин.

$$\theta(x, y, z, \tau) = \theta_x^{(2)}(x, \tau) + \theta_y^{(2)}(y, \tau) + \theta_z^{(2)}(z, \tau) + \theta^{(3)}(x, y, z, \tau) \quad (4)$$

Здесь $\theta_x^{(2)}(x, \tau), \theta_y^{(2)}(y, \tau), \theta_z^{(2)}(z, \tau)$ - решение трех одномерных задач, вида, например для $\theta_x^{(2)}(x, \tau)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x^2} = 0, \tau > 0, x \in (0, R_1); \theta_x^{(2)}(x, \tau)|_{\tau=0} = 0, x \in [0, R_1]; \\ \lambda \frac{\partial \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = Q_{x1}(\tau)|_{x=0, q_{x1}=0}, \tau \geq 0; \lambda \frac{\partial \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = Q_{x2}(\tau)|_{x=R_2, q_{x2}=0}, \tau \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Решение краевой $\theta^{(3)}(x, y, z, \tau)$ задачи с граничными условиями 3-го рода может быть выражено через произведение соответствующих одномерных задач

$$\theta^{(3)}(x, y, z, \tau) = \theta_x^{(3)}(x, \tau) \cdot \theta_y^{(3)}(y, \tau) \cdot \theta_z^{(3)}(z, \tau) \quad (6)$$

где множители являются решениями соответствующих краевых задач для одномерных бесконечных пластин с граничными условиями 3-го рода. Например, для $\theta_x^{(3)}(x, \tau)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial x^2} = 0, \tau > 0, x \in (0, R_1); \theta_x^{(3)}(x, \tau)|_{\tau=0} = 0, x \in [0, R_1]; \frac{\partial \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \\ = \alpha(\theta_{sr_1} - \theta_x^{(3)}(x, \tau)|_{x=0}), \tau \geq 0; \frac{\partial \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = \alpha(\theta_{sr_2} - \theta_x^{(3)}(x, \tau)|_{x=R_1}), \tau \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Температурное поле НК $T(x, y, z, \tau)$ будем аппроксимировать по мере необходимости вектор-функцией $\bar{T}_N(\tau) = [T_1(M_1, \tau), T_2(M_2, \tau), \dots, T_i(M_i, \tau), \dots, T_N(M_N, \tau)]$ или в приращениях к начальной температуре $\bar{\theta}(\tau) = [\theta_1(M_1, \tau), \theta_2(M_2, \tau), \dots, \theta_i(M_i, \tau), \dots, \theta_N(M_N, \tau)]$ размерности N в соответствии с i -и точками контроля температуры $M_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = \overline{1, N}$.

В третьей главе поставлена задача - в условиях ограничений $\bar{U}_{don} \subset L_2$ создать алгоритм автоматического управления

$$U(\tau) = (q_{t_1}(\tau), q_{t_2}(\tau), \dots, q_{t_N}(\tau), q_{tu_1}(\tau), q_{tu_2}(\tau), \dots, q_{tu_N}(\tau))^T \in \bar{U}_{don} \quad (8)$$

ОУ с распределенными параметрами (ОРП) (1) – (3), обеспечивающий максимально допустимый термоперепад $\max_{x,y,z} \left| \theta_{\max}(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=\tau_k} - \theta_{\min}(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=\tau_k} \right| \leq \varepsilon_{grad_1} = 4K$ между максимальной $\theta_{\max}(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=\tau_k}$ и минимальной $\theta_{\min}(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=\tau_k}$ температурой НК за заданное время $\tau = \tau_k$, не превышающее для рассматриваемого КА 5-6 орбитальных циклов.

Для решения задачи синтеза алгоритма и соответствующей САУ удобно использовать описание температурного поля в форме структуры пространственно - распределенных передаточных функций в виде однонаправленных блоков, на вход которой подаётся трансформанта Лапласа стандартизирующей функции (3). В качестве передаточной функции $W^{(2)}(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p)$ ОРП используется изображение по Лапласу функции Грина для краевой задачи (1)-(3) с граничными условиями 2 рода.:

$$W^{(2)}(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p) = \tilde{G}(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p) = \int_0^\infty G(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, \tau - t^*) \cdot e^{-p\tau} d\tau, \text{ где } \xi_x, \xi_y, \xi_z$$

- координаты теплоисточников. Передаточные функции для каждой из компонент: $\theta_x^{(2)}(x, \tau)$, $\theta_y^{(2)}(y, \tau)$, $\theta_z^{(2)}(z, \tau)$ в (4) можно получить из вспомогательных краевых задач (5), предполагая управляющими и возмущающими воздействиями потоки Q_{x_1} , Q_{x_2} , Q_{y_1} , Q_{y_2} , Q_{z_1} , Q_{z_2} в (3) на гранях НК. Функции Грина для каждой одномерной краевой задачи вида (5) имеют вид:

$$G_n(x, \xi_x, \tau - t) = \sum_{n=0}^\infty G_n^{(\tau)}(\mu_n, \tau - t) \varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi_x), \quad G_m(y, \xi_y, \tau - t) = \sum_{m=0}^\infty G_m^{(\tau)}(\psi_m, \tau - t) \varphi_m(\psi_m, y) \cdot \varphi_m(\psi_m, \xi_y),$$

$$G_\chi(z, \xi_z, \tau - t) = \sum_{\chi=0}^\infty G_\chi^{(\tau)}(\gamma_\chi, \tau - t) \varphi_\chi(\gamma_\chi, z) \varphi_\chi(\gamma_\chi, \xi_z), \text{ где } G_n^{(\tau)}(\mu_n, \tau - t) = \exp(-\mu_n^2 \tau),$$

$$G_m^{(\tau)}(\psi_m, \tau - t) = \exp(-\psi_m^2 \tau), \quad G_\chi^{(\tau)}(\gamma_\chi, \tau - t) = \exp(-\gamma_\chi^2 \tau) - \text{временные компоненты функции Грина;}$$

$$\varphi_n(\mu_n, x) = \cos(\pi n \frac{x}{R_1}) \frac{1}{E_n}, \quad \varphi_m(\psi_m, y) = \cos(\pi m \frac{y}{R_2}) \frac{1}{E_m}, \quad \varphi_\chi(\gamma_\chi, z) = \cos(\pi \chi \frac{z}{R_3}) \frac{1}{E_\chi} - \text{собственные}$$

функции, E_n , E_m , E_χ - нормирующие множители, а μ_n , ψ_m , γ_χ - собственные числа, полученные классическим решением соответствующей задачи Штурма-Лиувилля для граничных условий 2-го рода. Управляющее воздействие (8) представляет собой вектор тепловых потоков УИТ $q_{t_i}(\tau)$ и $q_{tu_i}(\tau)$, а возмущения также рассматриваются как потоки, поэтому свертка функции

Грина $G(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, \tau - t^*)$ с граничными условиями 2 рода позволяет определить

компоненту $\theta^{(2)}(x, y, z, \tau) = \theta_x^{(2)}(x, \tau) + \theta_y^{(2)}(y, \tau) + \theta_z^{(2)}(z, \tau)$ в (4). Компонента $\theta^{(3)}(x, y, z, \tau)$ в (4)

определяется сверткой функции Грина с граничными условиями 3го рода, которые по методу Э.Я Рапопорта можно аппроксимировать комбинацией решений для граничных условий 2рода. Тогда решение краевой задачи (1) -(3) примет вид :

$$\theta(x, y, z, \tau) = \int_0^\tau \int_0^{R_1} w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau) \cdot G_n(x, \xi_x, \tau - t) dx dt + \int_0^\tau \int_0^{R_2} w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau) \cdot G_m(y, \xi_y, \tau - t) dy dt +$$

$$+ \int_0^\tau \int_0^{R_3} w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau) \cdot G_\chi(z, \xi_z, \tau - t) dz dt, \text{ где}$$

$$\begin{aligned}
G_x(x, p) &= a\lambda^{-1}(W_x^{(2)}(x, \xi_x, p)) = (c \cdot \rho \cdot R_1)^{-1} \cdot \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{x}{R_1}) \cdot R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} \cdot \right. \\
&\cdot \left. \left[R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\}; G_y(y, p) = a\lambda^{-1}(W_y^{(2)}(y, \xi_y, p)) = (c \cdot \rho \cdot R_2)^{-1} \cdot \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cdot \right. \\
&\cos(\pi \cdot m \cdot \frac{y}{R_2}) \cdot R_2^2 (a\pi^2 m^2)^{-1} \left[R_2^2 (a\pi^2 m^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \left. \right\}; G_z(z, p) = a\lambda^{-1}(W_z^{(2)}(z, \xi_z, p)) = \\
&= (c \cdot \rho \cdot R_3)^{-1} \cdot \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{\chi=1}^{\infty} (-1)^\chi \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{z}{R_3}) \cdot R_3^2 (a\pi^2 \chi^2)^{-1} \left[R_3^2 (a\pi^2 \chi^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\} \quad (9)
\end{aligned}$$

Структура каждой из передаточных функций (9) имеет вид суммы интегрирующего звена с бесконечным числом аперидических звеньев с уменьшающимися при увеличении их порядкового номера постоянными времени и коэффициентами, зависящим от собственных функций $\varphi_n, \varphi_m, \varphi_\chi$ и собственных чисел $\mu_n, \psi_m, \gamma_\chi$). Например, для краевой задачи (5):

$$W_x^{(2)}(x, \xi_x, p) = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot R_1} \left[\frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos(\pi n \frac{x}{R_1}) \cos(\pi n \frac{\xi_x}{R_1}) \frac{R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1}}{R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} p + 1} \right] \quad (10)$$

На рисунке 2 приведена структура ОРП (1) – (3), (10) по каналу «точка-точка» для произвольной точки $M(x, y, z)$ НК с параметрами:

$$\begin{aligned}
K_n^x &= 2(\cos(\pi n \frac{x}{R_1}) \cos(\pi n \frac{\xi_x}{R_1})) R_1^2 / a\pi^2 n^2, \quad K_m^y = 2(\cos(\pi m \frac{y}{R_2}) \cos(\pi m \frac{\xi_y}{R_2})) R_2^2 / a\pi^2 m^2, \\
K_\chi^z &= 2(\cos(\pi \chi \frac{z}{R_3}) \cos(\pi \chi \frac{\xi_z}{R_3})) R_3^2 / a\pi^2 \chi^2 \quad (11)
\end{aligned}$$

$$T_{xn} = \frac{R_1^2}{a\pi n^2}; \quad T_{ym} = \frac{R_2^2}{a\pi m^2}; \quad T_{z\chi} = \frac{R_3^2}{a\pi \chi^2}; \quad a = \frac{\lambda}{c\rho}; \quad n = \overline{1, \infty}, m = \overline{1, \infty}, \chi = \overline{1, \infty} \quad (12)$$

Передаточные функции $W_{OV}^{(2)}(\xi_x, \xi_y, \xi_z, x, y, z, p)$ в форме (10) (см. рисунок 2) и аналогичные ей моделируют каналы передачи тепла от точечного теплоисточника к точке контроля. В ФОМ ОУ качестве «точек» рассматриваются точки приложения мощностей УИТ, контроля температуры, крепления НК к КА, крепления оболочки к НК. В качестве «областей» рассматриваются площади граней НК, граней защитного кожуха, посадочных мест под аппаратуру на НК и проекций оболочки на НК. В такой постановке возможны четыре варианта каналов передачи: «Точка → Точка», «Точка → Площадь», «Площадь → Точка» и «Площадь → Площадь». Коэффициенты этих передаточных функций по каналу «Точка → Точка» определены формулами типа (11), (12). Коэффициенты передаточных функций по каналу «Точка → Площадь», исходя из вариантов расположения «Площади», с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам учитывают пространственную распределенность соответствующих областей. Коэффициенты передаточных функций по каналу «Площадь → Точка» определяются аналогично коэффициентам передаточных функций по каналу «Точка → Площадь». При этом изменяются показатели пространственной распределенности, $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$. ММ ОУ в форме структуры передаточных функций с распределенными параметрами (см. рис2) определяется в диссертации как функционально-ориентированная математическая модель - ФОМ ОУ.

Например, для площади грани №1(от 0 до R_1 , от 0 до R_2 , от 0 до R_3 , координаты источника

$$\text{«Точки»} \quad (\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1}): \quad K^x(x, \xi_x) = K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) dR_x,$$

$$K^y(y, \xi_y) = K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y1}}{R_2}) dR_y, \quad K^z(z, \xi_z) = K_\chi^{III}(z, \xi_z) =$$

$$= \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z1}}{R_3}).$$

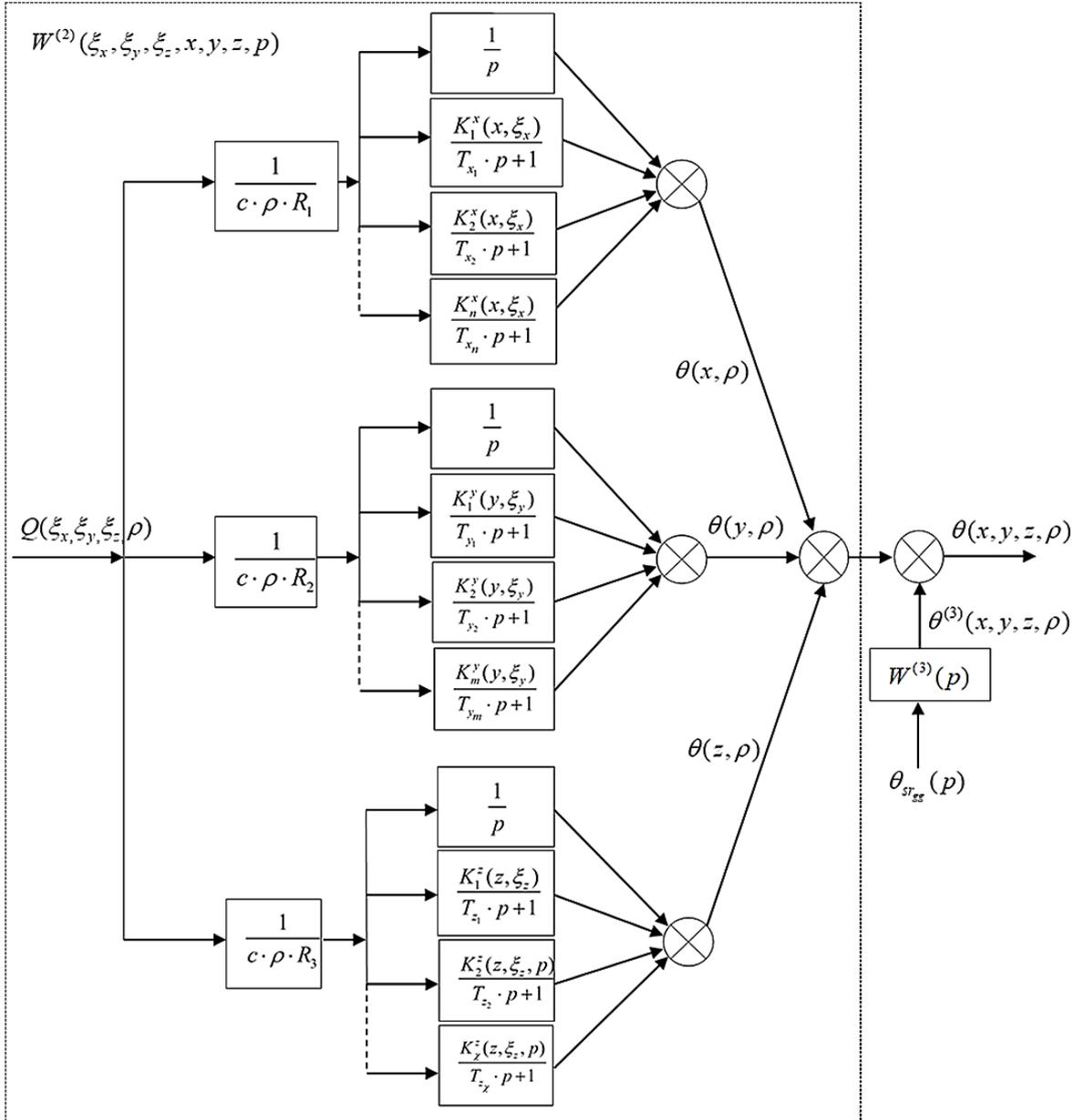


Рисунок 2 - Упрощенная расчетная структура $W_{oy}^{(2)}(M, p)$ объекта управления

Вопрос количества членов ряда в (3.9), (3.10) трансформируется в проблему ограничения числа аperiodических звеньев в структурной схеме на рисунке 2 и решается путем параметрической идентификации усеченного ряда (10) путем сравнения с численным экспериментом на уточненной конечно-элементной модели в среде «Ansys», где в качестве параметров рассматриваются числа N , M , χ , коэффициенты $K^x(x, \xi_x)$, $K^y(y, \xi_y)$, $K^z(z, \xi_z)$ и постоянные времени T_{x_n} , T_{y_m} , T_{z_χ} , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $\chi = \overline{1, \chi}$. (см.(10),(11)) Идентификация в программной среде «Matlab» произведена по методике М.Ю.Лившица, Ю.О.Савельевой и установлены модифицированные значения коэффициентов и постоянных времени, а также установлено допустимое по точности количество аperiodических звеньев в структуре на рис. 2 $N = M = \chi = 3$.

В четвертой главе разрабатывается подсистема автоматического управления температурой НК ИИС. С целью стабилизации температурного поля в НК ИИС в условиях воздействия нестационарного и неравномерного теплового возмущения подсистема автоматического управления построена по следующей обобщенной структурной схеме (см. рисунок 3). Обратная отрицательная связь по отклонению температуры $\theta_i(x_i, y_i, z_i, \tau)$ от заданной управляющим устройством УУ в соответствии с алгоритмом температуры $\theta_{\text{спец}i}(\tau)$ обеспечивает компенсацию возмущений $q_{\text{возм}}(\tau)$ температуры $\theta_i(x_i, y_i, z_i, \tau)$. Эти возмущения отражают влияние регуляторов других контролируемых точек $M_j, j \neq i, j = \overline{1, N}$ неуправляемых тепловыделяющих приборов и открытия, и закрытия люков в оболочке, изменения теплообмена в точках крепления НК.

Температура $\theta_i(x_i, y_i, z_i, \tau) i = \overline{1, N}$ каждой i -ой регулируемой точки $M_i(x_i, y_i, z_i)$ НК определяется мощностью i -го УИТ, регулируемой с помощью i -го регулятора с передаточной функцией:

$$W_{\text{рег}}(p) = W_{\text{рег}}^{\text{ПИ}}(p) = K_p^{\text{ПИ}} \frac{T_p^{\text{ПИ}} p + 1}{T_p^{\text{ПИ}} p}, \quad \text{либо} \quad W_{\text{рег}}(p) = W_{\text{рег}}^{\text{ПИД}}(p) = K_p^{\text{ПИД}} \frac{T_p^{\text{ПИД}} p + T_p^{\text{ПИД}} T_D^{\text{ПИД}} p^2 + 1}{T_p^{\text{ПИД}} p},$$

воздействующего на объект с передаточной функцией

$W_{\text{ОУ}}(p)$ (см. рис. 2). При этом каждая локальная САУ $_i$ (см рис. 3) стабилизирует температуру в i -й точке НК, имеет передаточную функцию по i -му каналу управления:

$$W^y_{\text{САУ}_i}(p) = \frac{W_{\text{ОУ}_i}^{(2)}(p)}{1 + W_{\text{РЕГ}_i}(p) W_{\text{ОУ}_i}^{(2)}(p)}.$$

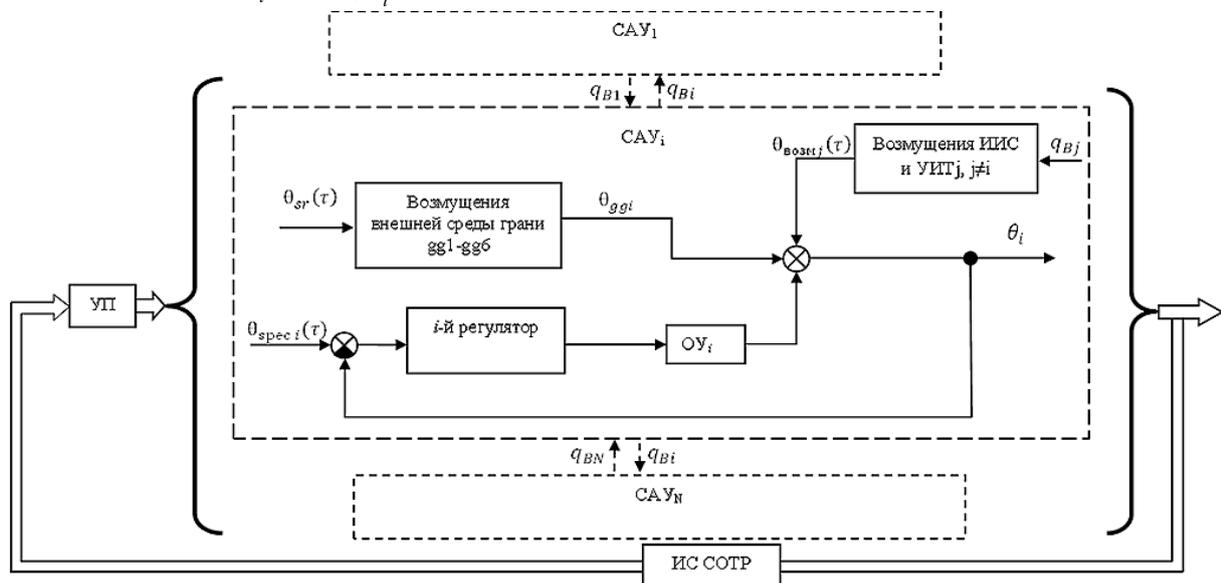


Рисунок 3 - Увеличенная схема подсистемы управления температурой НК в ИИС КА
УП – управляющая супервизорная программа, УИТ – управляемый теплоисточник, САУ $_i$ – локальная система автоматического управления для зоны i -ой контрольной точки НК, ОУ – объект управления, ИС СОТР – измерительная система СОТР

На температуру $\theta_i(x_i, y_i, z_i, \tau)$ воздействуют теплообмен всех 6-и граней НК с окружающей средой и другие виды возмущений соответствии с передаточной функцией по каналу возмущения:

$$W^6_{\text{САУ}_i}(p) = \frac{W_{\text{ВОЗМ}_i}(p)}{1 + W_{\text{РЕГ}_i}(p) W_{\text{ОУ}_i}^{(2)}(p)},$$

где передаточная функция для отдельных видов возмущений (см. рис.2, 3) имеет вид:

$$W_{ВОЗМ_i}(p) = \begin{cases} W_{OY_j}^{(2)}(p), j \neq i, q_A(p) = q_{ij}(p) = q_{inj}(p) & \text{Здесь } G_{g_j}(M_i, p), g = \overline{1,6}, j = 1, 2, \dots - \\ W^{(2)}(p), j \neq i, q_B(p) = q_{ld_{1,2}}(p), q_{P_{a,b}}(p), q_{P_{r_{1-4}}}(p), q_{P_{1,2}}(p), & \text{передаточная функция «площадь –} \\ q_{\alpha_k}(p), q_{\alpha_{uk}}(p), q_{s_{1,2}}(p), q_{h_{1,2}}(p), q_{c_g}(p), q_{r_y}(p), q_{ru_y}(p) & \text{точка», отражающая влияние} \\ & \text{температуры грани на температуру} \\ & \text{контрольной точки } M_i. \text{ Алгоритм} \\ & \text{работы подсистемы управления} \end{cases}$$

температурой НК ИИС с регулятором переменной структуры для повышения быстродействия реализует в режиме реального времени в зависимости от величины рассогласования релейный и непрерывный, например, пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования.

$$P_s(\tau) = \begin{cases} P_{max}, \Delta T \geq \Delta T_{max}, P_s \geq P_{max} & \text{Мощность } P_s(\tau_j) \text{ УПИ ограничена} \\ k_p \cdot \Delta T(\tau) + \frac{k_p}{T_p} \int_0^\infty \Delta T(\tau) d\tau, \varepsilon \leq \Delta T < \Delta T_{max} & 0 \leq P_s(\tau_j) \leq P_{max}, P_{max} = 30 \text{Вт}. \text{ Величина } \varepsilon \\ 0, \Delta T < \varepsilon, P_s \leq 0 & \text{характеризует зону нечувствительности} \\ & \text{регулятора } (\varepsilon = 4 \text{К}). \end{cases}$$

В связи с астатическим характером передаточной функции (10) объекта управления $W_{OY}^{(2)}(p)$ пропорциональный закон регулирования обеспечил бы нулевую статическую ошибку при постоянном во времени управлении. Однако, в силу астатического характера передаточной функции $W_{ВОЗМ_i}(p)$ динамический характер возмущения на выходе ОУ (см. рис.3), приведет к ненулевой ошибке по скорости изменения выходного сигнала даже при постоянном возмущении $q_g(\tau)$. Ситуация осложняется тем, что возмущения $q_g(\tau)$ со стороны тепловыделяющей аппаратуры, смежных регуляторов сами содержат значительную динамическую компоненту. Поэтому в структуре САУ использованы ПИ и ПИД-регуляторы. Настройка параметров регулятора произведена программно пакетом “Matlab» в разделе “Simulink” с использованием операции “Tuner” из условия удовлетворения заданным показателям качества САУ переуправление $\sigma \leq 30\%$, степень затухания $\psi \geq 97\%$, $\Delta T|_{\tau=\tau_k} \leq 4^\circ \text{К}, \tau_k \rightarrow \min$. При этом выполняется условие обеспечения в установившемся режиме работы САУ $\tau_k \rightarrow \infty$ нулевой статической ошибки $\Delta T|_{\tau_k \rightarrow \infty} = 0$ для возмущения в форме функции Хевисайда. Кроме того, несмотря на допустимость некоторого перерегулирования и колебательности следует, по возможности, пытаться исключить такие режимы работы САУ как нежелательные. На рисунках 4-8 приведены результаты настройки ПИ и ПИД регуляторов и моделирования отработки возмущений со стороны смежных локальных САУ при выбранных настройках. Результаты демонстрируют достаточно высокое качество работы локальных САУ и простейшего алгоритма подсистемы управления температурой НК ИИС КА.

В пятой главе предложены два варианта рабочих алгоритмов работы управляющей супервизорной программы УП (см рис 3), определяющей заданную температуру $\theta_{spec}(\tau)$ для каждой локальной САУ в СОТР. Эти АТСТ отличаются друг от друга ресурсоемкостью, эксплуатационными и потребительскими качествами, но оба могут с успехом быть использованы в АО различного назначения. Встроенная диагностика обоих алгоритмов включает в себя проверку исправности средств контроля температур (см. рис. 10) и УИТ с использованием цепи с ненулевым начальным значением токового сигнала. Логика функционирования непрерывного алгоритма (рис 9,10,11) основана на определении задающего воздействия $\theta_{spec}(\tau)$ для локальных САУ температурой НК с ПИД-законом регулирования в зависимости от текущей максимальной температуры НК в контрольных точках $M_j, j = \overline{1,64}$ НК. В релейном АТСТ управление осуществляется путем последовательного многопозиционного релейного изменения мощности $P_i(\tau), P_{tu}(\tau)$ УИТ (рис. 12,13).

Параметры настройки ПИ-регулятора

№ точки	$K_p^{ПИ}$	$T_p^{ПИ}$
t1	3,2	65
t2	2,5	90
tu2	1,5	100
t3	1,7	112
tu3	2,83	243
t4	2,3	175
tu4	2,7	200
t5	2,9	270
tu5	2,6	235
t6	2,4	210

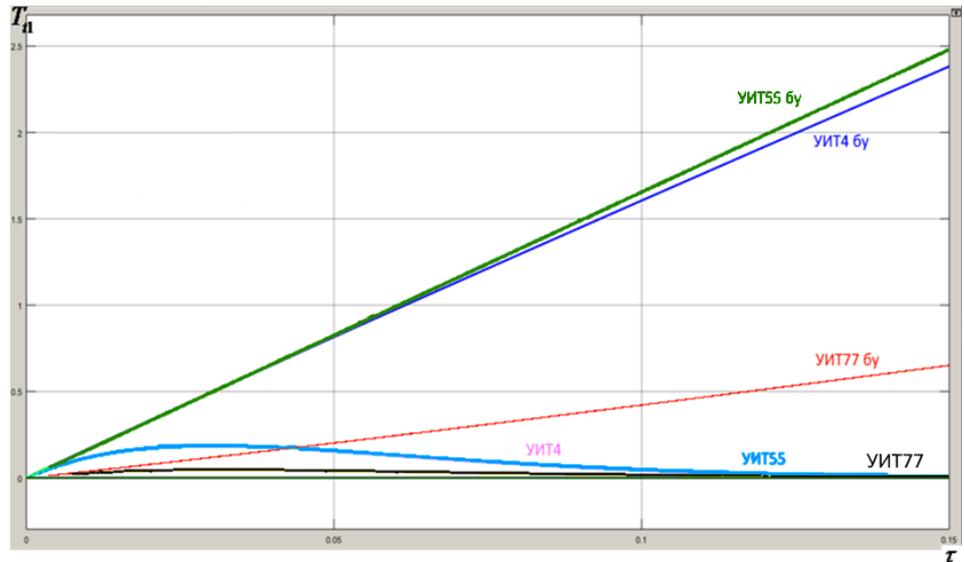


Рисунок 4 - Реакция локальной САУ₁ с ПИ-регулятором в точке М₁ на линейно нарастающие возмущения различных УИТ (б.у. - без управления)

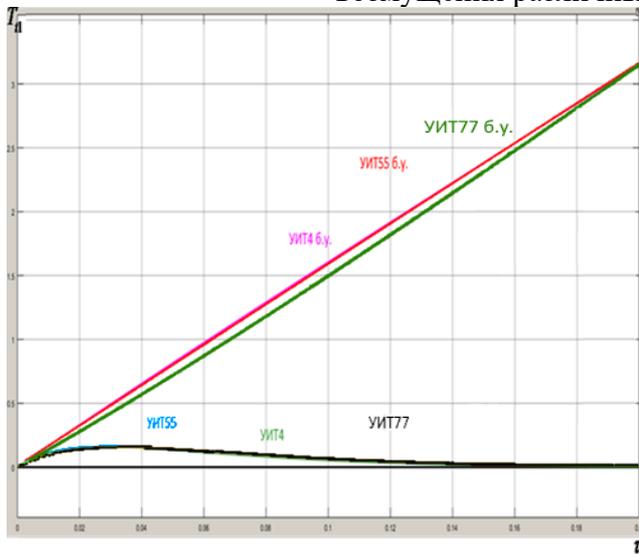


Рисунок 5 - Реакция САУ_i с ПИД-регулятором на возмущения различных УИТ (б.у. - без управления)

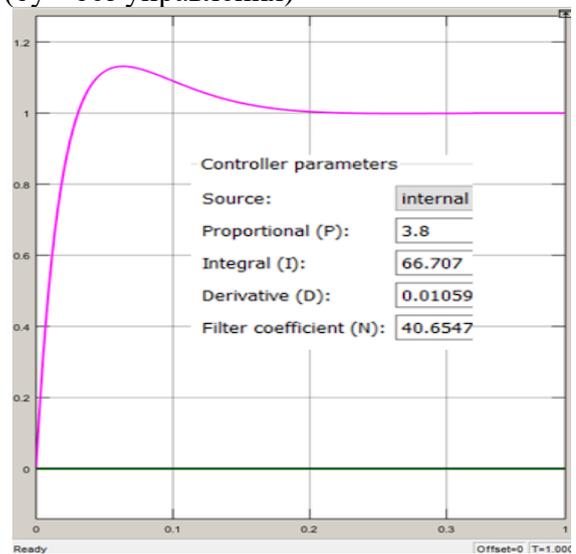


Рисунок 6 - Переходный процесс по управлению в САУ с ПИД регулятором

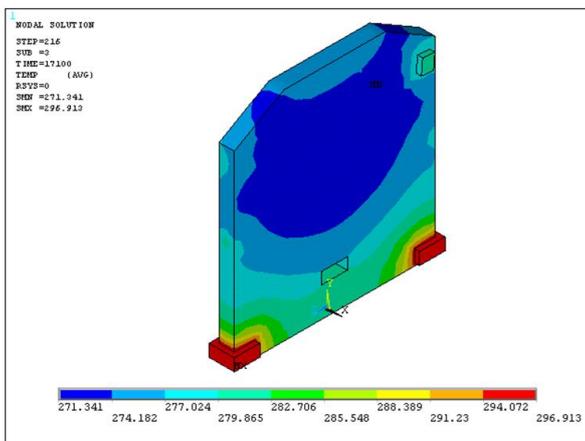


Рисунок 7 – Распределение температур в НК после 216 шага нагружения без регулирования. Цикл 3. Крышки открыты.

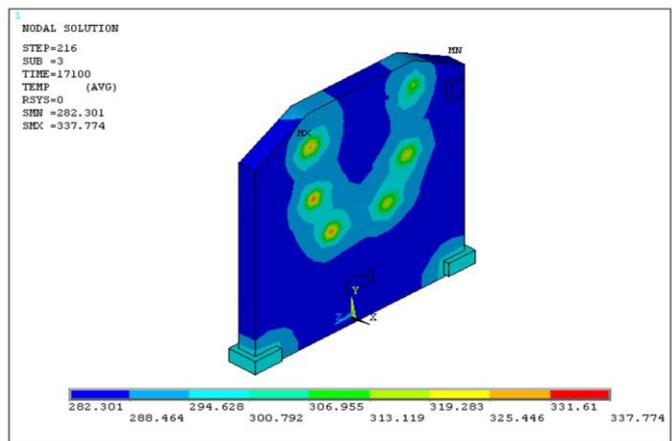


Рисунок 8 – Распределение температур в НК после 216 шага нагружения с использованием алгоритма управления. Цикл 3. Крышки открыты.

Первый модуль определяет, находится ли температура регулируемой точки $M_j, j = \overline{1,64}$ НК в

назначенном диапазоне и формирует необходимые для попадания в этот диапазон уровни подключаемой мощности УИТ. При попадании температуры точки $M_j, j = \overline{1, 64}$ НК в заданный диапазон, обработка второго модуля контролирует сохранение температурного перепада для рассматриваемой симметричной пары датчиков $t_j - t_{uj}$ в назначенном диапазоне, формирует необходимые для этого уровни подключаемой мощности $P_i(\tau), P_{iu}(\tau)$ УИТ.

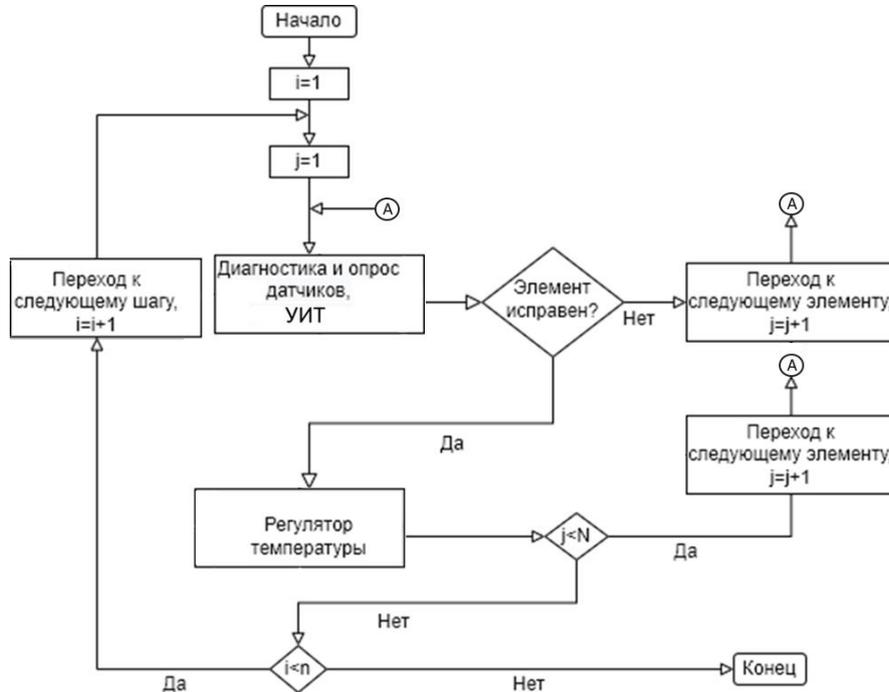


Рисунок 9 - Общая схема непрерывного АТСТ

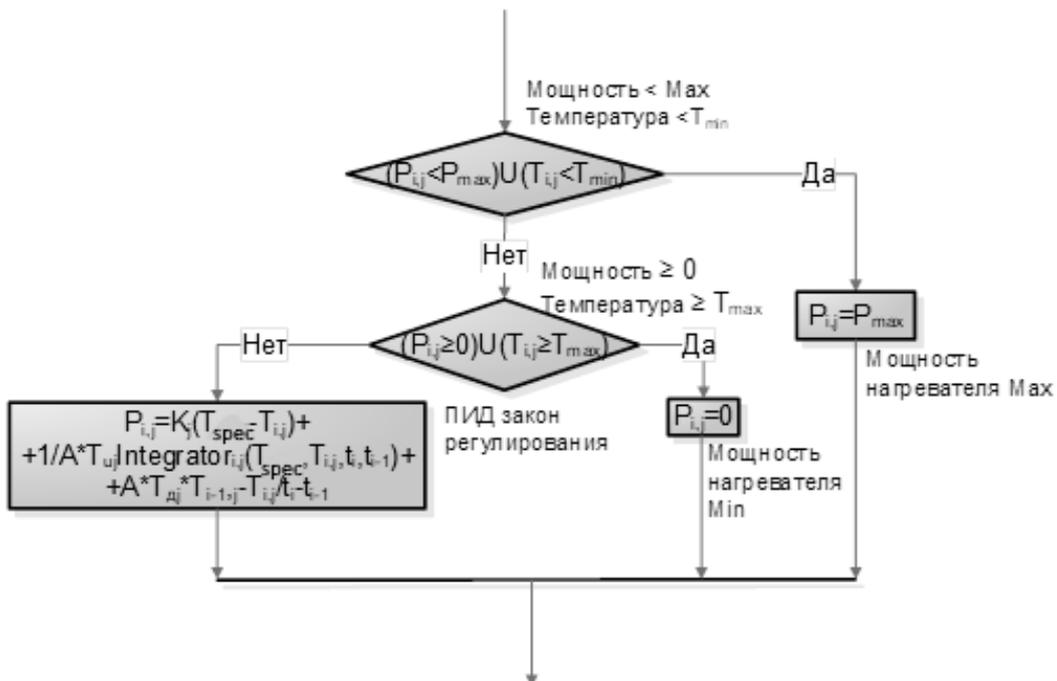


Рисунок 10 - Схема блока ПИД -управления непрерывного АТСТ

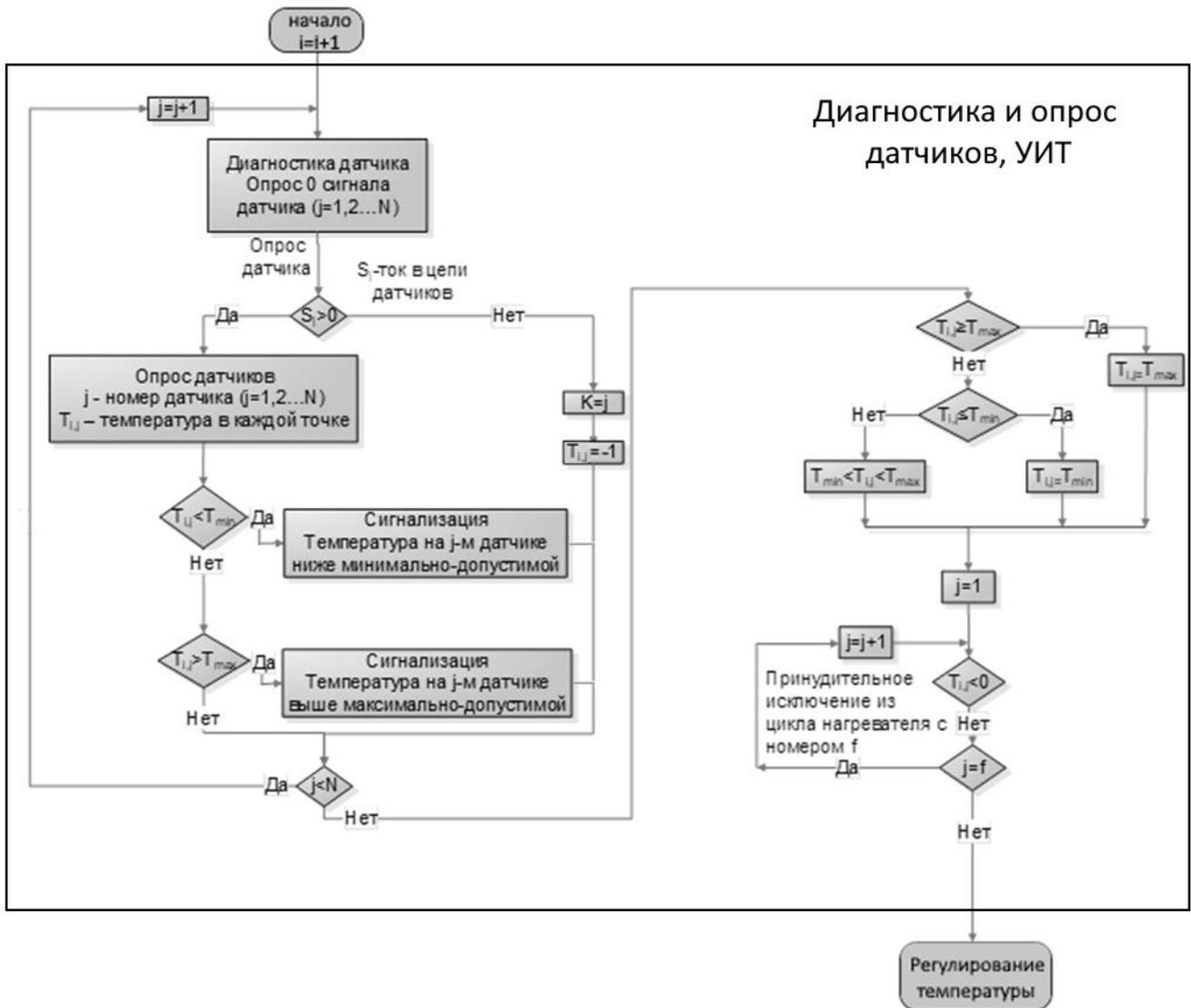


Рисунок 11 - Схема алгоритмического блока диагностики АТСТ, расположенных на одной подложке с УИТ t_i и t_{ii}

С помощью пакета «ANSYS» построена свободная от большинства принятых при построении ФОМ допущений имитационная конечно-элементная нелинейная модель температурного поля НК ИИС КА и получены результаты сравнительного анализа трех вариантов: без регулирования, с релейным АТСТ и с непрерывным АТСТ (рис 14,15).

Для имитационного конечно-элементного моделирования температуры НК выделены два основных режима работы ИИС КА: штатный и нештатный. Нештатными считаются условия, в которых в результате сбоя механизм закрытия люка не сработал должным образом, и створка осталась в открытом положении. В ходе имитационного моделирования установлена эффективность обоих алгоритмов и локальных САУ. При этом средняя амплитуда колебаний температуры НК в относительных единицах в непрерывном алгоритме на 0.15 относительных единиц (0.45 К) меньше по сравнению с режимом без регулирования и на 1.04 единицы (3.12 К) меньше по сравнению с релейным алгоритмом. Быстродействие непрерывного алгоритма значительно выше, чем релейного (17 сек. и 120 сек. при открытии люков), максимальное значение пиков отклонений температуры от максимально заданного значения ниже у непрерывного алгоритма по сравнению с релейным (6.1 % и 54.3 % при открытии люков). Температурный перепад при открытии люков так же ниже у непрерывного алгоритма 0.27 ед. (0.81 К) и 0.51 ед. (1.53 К) в относительных единицах).

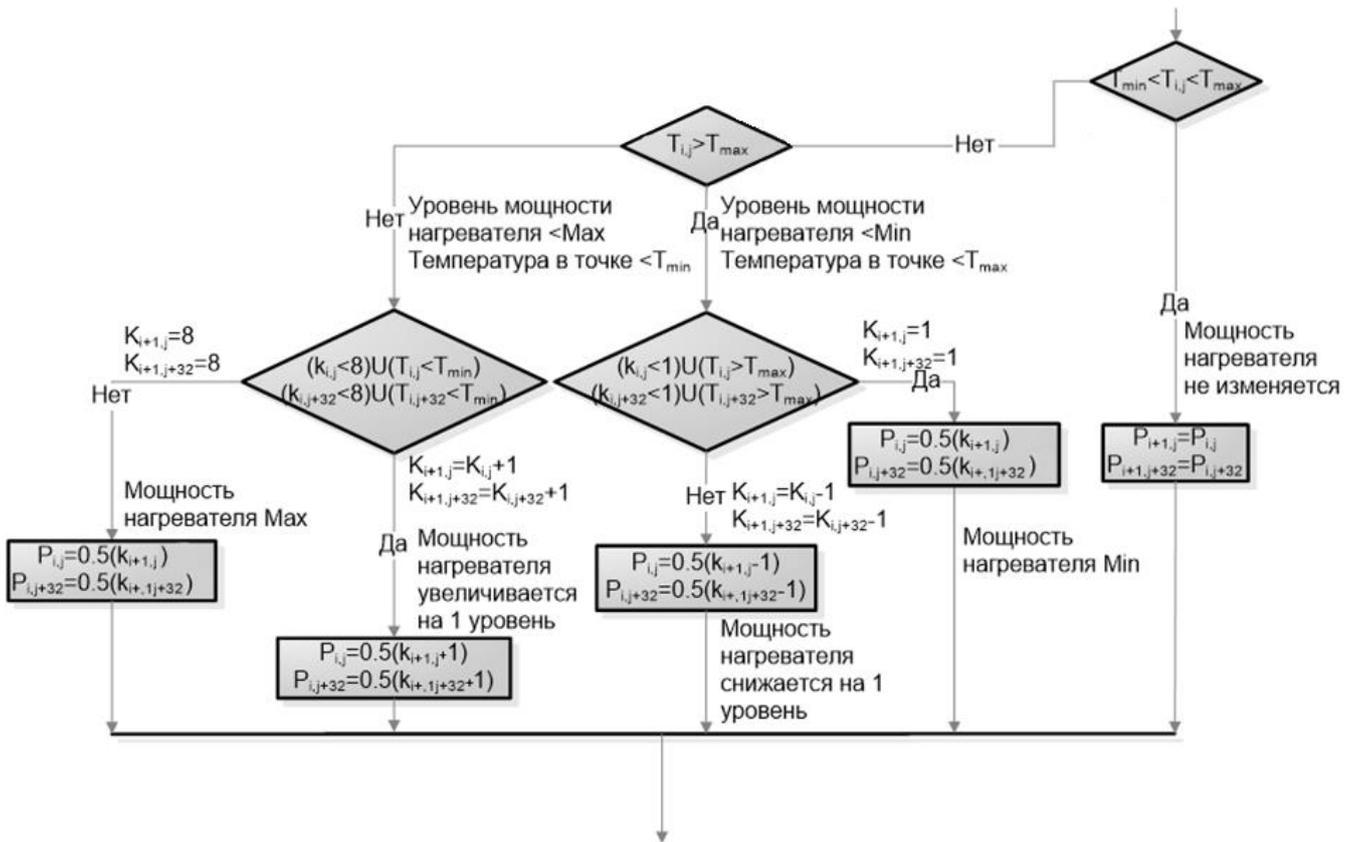


Рисунок 12 - Блок 1 температуры релейного АТСТ

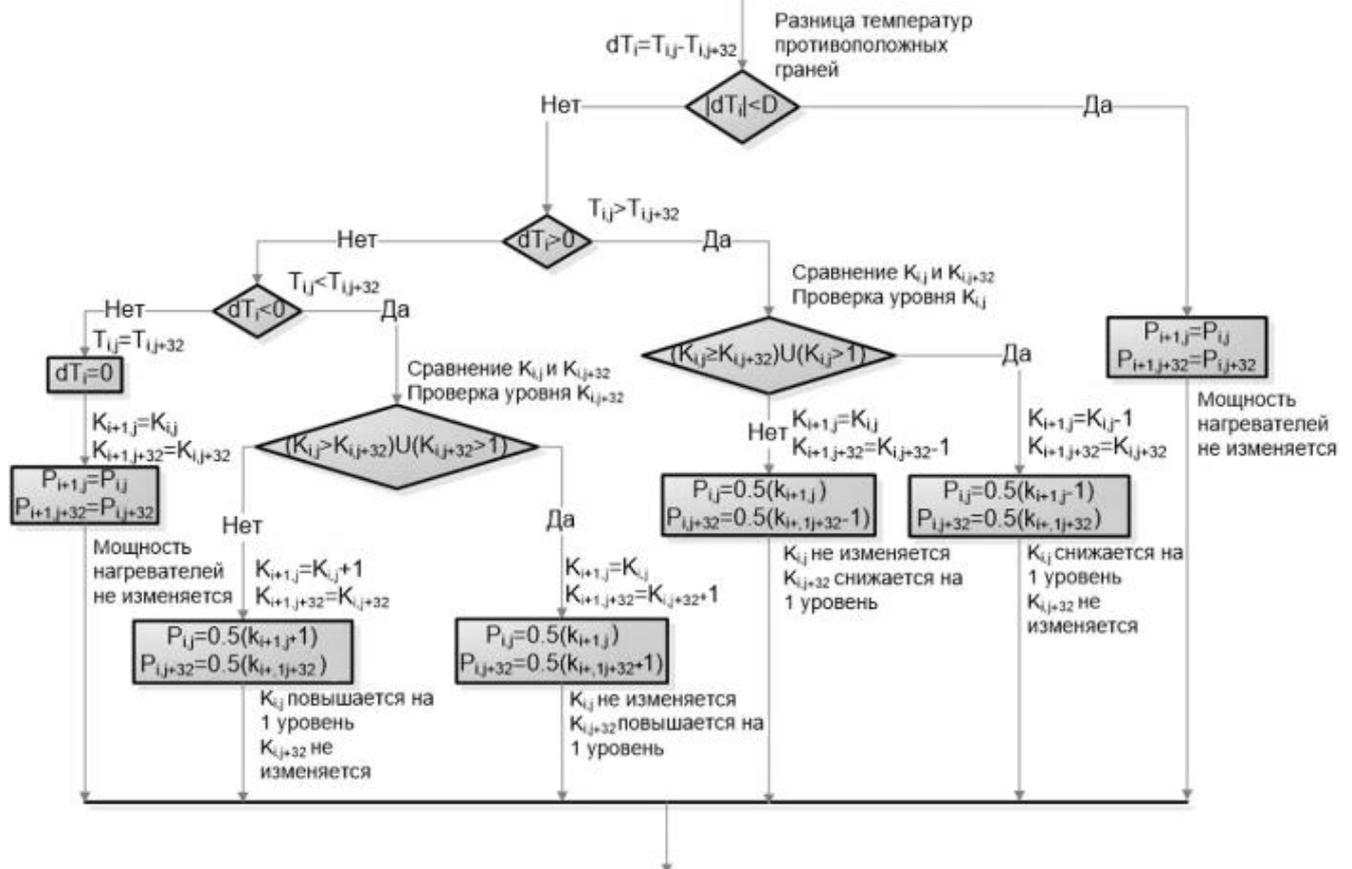
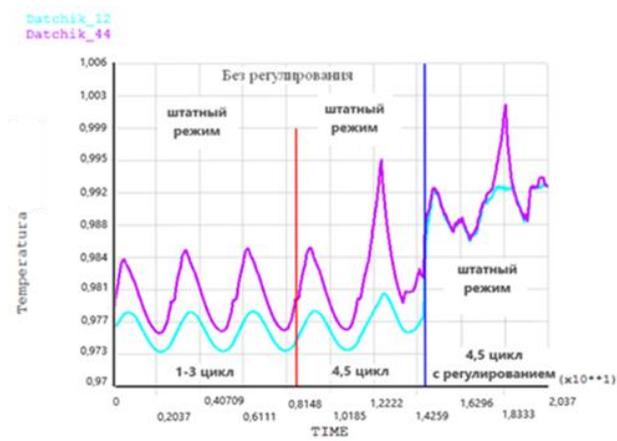
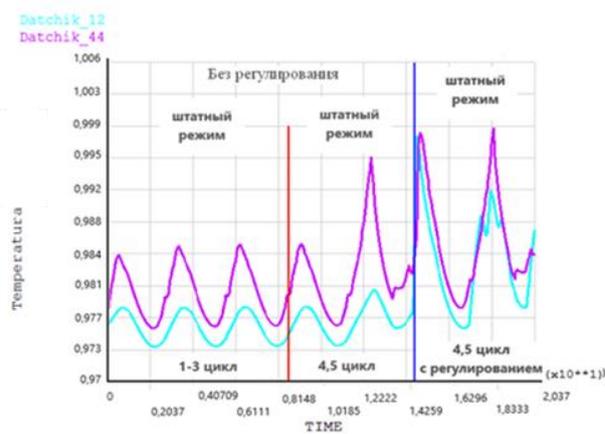


Рисунок 13 - Блок 2 термоперепада релейного АТСТ

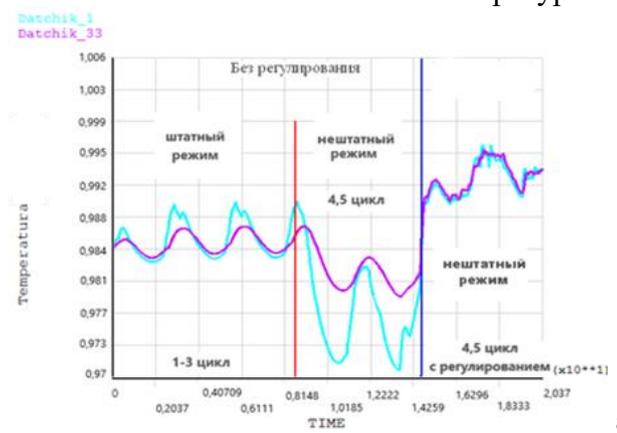


а)

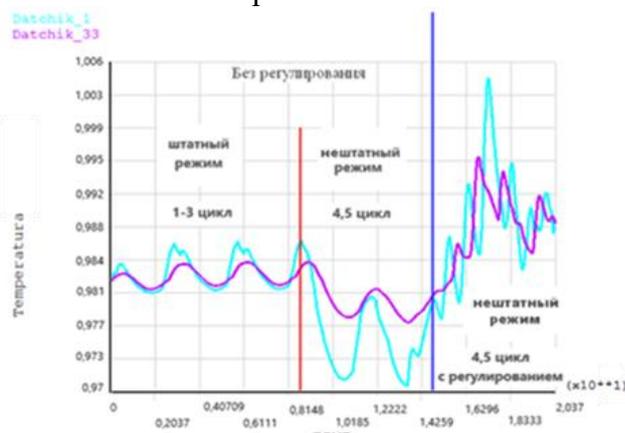


б)

Рисунок 14 – Температура НК в зоне датчиков №12, №44 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ температурой НК ИИС КА в штатном режиме



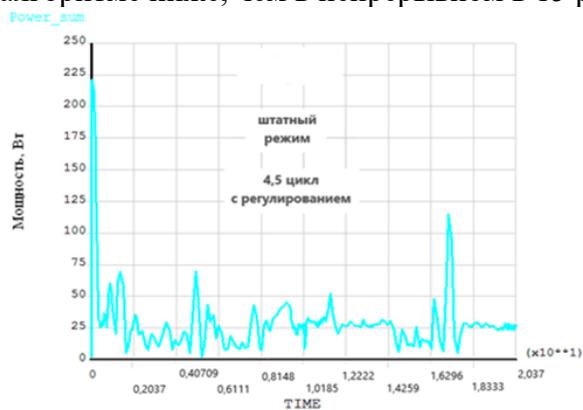
а)



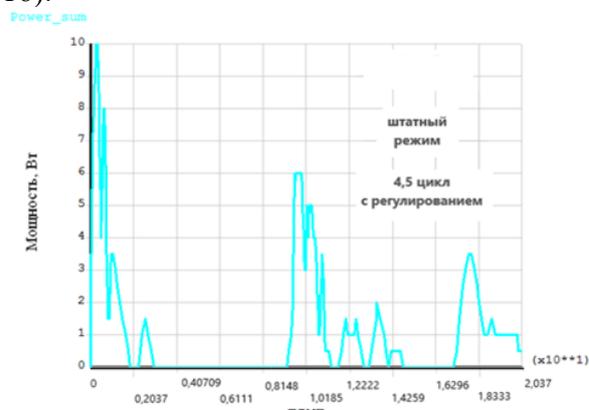
б)

Рисунок 15 – Температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА в нештатном режиме

Основными преимуществами непрерывного алгоритма являются: непрерывное изменение мощности УИТ, что снижает риск резкого изменения температуры и образования трещин; повышение точности регулирования, за счет исключения статической ошибки, характерной для релейных алгоритмов; снижение времени регулирования, за счет наличия дифференциальной составляющей в законе регулирования. Релейный алгоритм требует для своего функционирования значительно меньше бортового энергоресурса, затрачиваемая на термоградиентную стабилизацию средняя мощность для рассматриваемого типа КА в релейном алгоритме ниже, чем в непрерывном в 15 раз (рис16).



а)



б)

Рисунок 16 – Общая мощность УИТ при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ в штатном режиме

В шестой главе поставлена и решена задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении НК. В этом разделе рассматривается применение КА

той же, что и ранее конструкции, но с ограниченной областью использования, что позволяет выделить ответственное за термдеформацию НК ее сечение, снизить требования к погрешности температурного режима и не рассматривать ряд возмущений в качестве актуальных. В рассматриваемом КА с противоположных сторон НК имеются прямоугольные области S1 и S2 (рис. 19), на которые, через открытые люки воздействует температура внешней среды. На боковых поверхностях НК установлены тепловыделяющие приборы, периодически включаемые в работу и УИТ 1,2,3,4,5,6, закрепленные на поверхности областей S1 и S2 на противоположных гранях gg1 ($z=0$) и gg2 ($z=R_3$) НК. Выбор ответственного сечения определяется комплексным решением термдеформационной и оптикомеханической задач для соответствующей компоновки оборудования на НК.

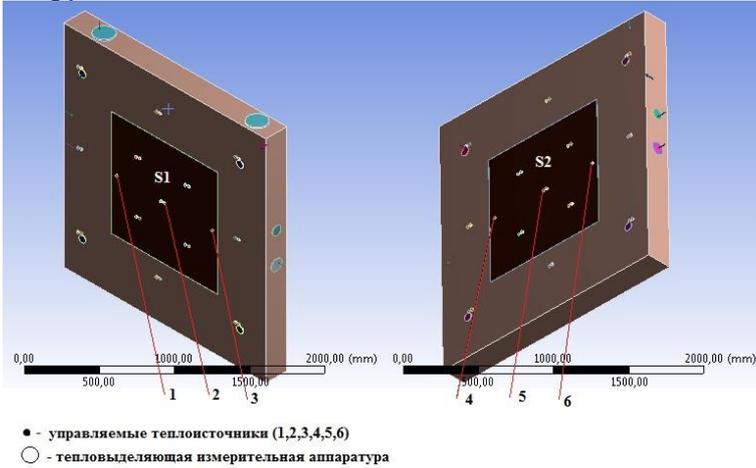


Рисунок 17 - Расположение теплоисточников на НК

заданном сечении НК. Поэтому в стандартизирующей функции (3) $\omega(M, \varphi)$ управляющее воздействие для наиболее значимых тепловыделяющих элементов ИИС и УИТ (N_α из общего числа N см. рис 19), соответствующие слагаемые в (3) запишем в форме:

$$\sum_{i=1}^N q_{ti}(\tau) V_{ti}(x, y^*) = \sum_{i=1}^3 q_{ti}(\tau) V_{ti}(x, y^*) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{tui}(\tau) V_{tui}(x, y^*) = \sum_{i=1}^3 q_{tui}(\tau) V_{tui}(x, y^*) \quad (14)$$

причем значимые УИТ расположены симметрично по 3 на каждой грани gg1 и gg2 на линиях $y = 0.5R_2, z = 0$; $y = 0.5R_2, z \in [0, 0.5R_3]$, а остальные УИТ предполагаются источниками возмущающих воздействий, как и другие тепловыделяющие элементы ИИС (см. рис.19). Координаты расположения значимых УИТ заданы функциями: $V_{ti}(x, y^*) = \delta_i(x - x_i)|_{y=0.5R_2, z=0}$; $V_{tui}(x, y^*) = \delta_i(x - x_i)|_{y=0.5R_2, z=R_3}$. Требуется определить оптимальный

закон $U^{opt}(\tau)$ изменения тепловых потоков $q_{ti}(\tau, x_i)|_{z=0, y=0.5R_2, x=x_i}$, $q_{tui}(\tau, x_i)|_{z=R_3, y=0.5R_2, x=x_i}$, $i = \overline{1, N_\alpha}$ в

условиях ограничений по допустимой температуре

$$\theta(M, \tau) \leq \theta_d, \quad \theta_d = const, \quad \tau \in (0, \infty), \quad M \in \Omega_M \subset D_x \cup D_y \cup D_z \quad (15)$$

и на ресурс управления

$$0 \leq P_s(\tau_j) \leq P_{max} \quad (16)$$

при воздействии на ОУ (1)-(3) возмущений $q_{\text{возм}}(\tau)$ (см. рис. 3), обеспечивающий:

$$J = J^{opt}(U_{opt}^{(\beta)}(\tau)) = \min_{U_{opt}^{(\beta)}(\tau) = U_{opt}^{(1)}(\tau)} J, \quad J = \left\| \theta(x, y, z, \tau_k - \theta_{spec}) \right\|_{L_\infty[M^* \in L^*]} = \max_{M \in L^*} \left| \theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec} \right|$$

Рассмотрим актуальную задачу определения алгоритма управления мощностью $P_{ii}(\tau)$ только тех УИТ, которые размещены в непосредственной близости от линии ответственного сечения $L^*(M^*) \in \Omega_M, M^* \in L^* \subset M$ с координатами $x \in [0, R_1]; y^* = 0.5R_2;$

$z^* \in [0, 0.5R_3]$, обеспечивающего при их заданном количестве и расположении, минимальное отклонение

$$\tilde{\theta}(M, \tau)|_{\tau=\tau_k} = \left| \theta(M^*, \tau)|_{\tau=\tau_k} - \theta_{spec}(\tau_k) \right|$$

от требуемой температуры θ_{spec} в

$$L^* = \left\{ x: x \in [0, R_1], y^* = \overline{0, 0.5R_2}, z^* = \overline{0, 0.5R_3} \right\}, \quad J^{\text{opt}}(U_{\text{opt}}^{(\beta)}(\tau)) = J^{\text{opt}}(q_{x(\text{opt})}^{\beta}, q_{y(\text{opt})}^{\beta}, q_{z(\text{opt})}^{\beta}),$$

$$\theta_{\text{spec}} = \text{const}, \quad M^* \in L^* \mathcal{C}M \text{ при произвольном значении } \tau = \tau_k - \text{задача максимальной точности}$$

$$(\beta=1) \text{ или } \min \tau(q_{x(\text{opt})}^{\beta}, q_{y(\text{opt})}^{\beta}, q_{z(\text{opt})}^{\beta}) \text{ при заданном значении } J = J_{\text{доп}} - \text{задача быстродействия}$$

$$U_{\text{opt}}^{(\beta)}(\tau) = U_{\text{opt}}^{(2)}(\tau)$$

($\beta=2$). В этой постановке задача максимальной точности принимает форму оптимальной минимаксной задачи:

$$J^{\text{opt}} = \min_{q_{ii}^{(1)}, q_{iui}^{(1)}} \max_x \left| \theta(M^*, \tau_k - \theta_{\text{spec}}) \right| \quad (17)$$

при бесконечном количестве ограничений вида (15) в модальном пространстве трансформант температуры $\theta(M, p)$.

В случае задачи быстродействия ($\beta=2$) $J^{\text{opt}} = \min_{q_{ii}^{(1)}, q_{iui}^{(1)}} \tau_k$ критерий (17) трансформируется в

бесконечное число ограничений вида: $\max_{x \in M^*} \left| \theta(M^*, \tau_k - \theta_{\text{spec}}) \right| \leq \varepsilon_{\text{доп}}$. Управление осуществляется

синхронно всеми 6-ю симметрично расположенными в соответствии УИТ_i

$U^{(\beta)}(\tau) = (q_{i1}^{(\beta)}, q_{i2}^{(\beta)}, q_{i3}^{(\beta)}, q_{iui1}^{(\beta)}, q_{iui2}^{(\beta)}, q_{iui3}^{(\beta)})$. Для решения поставленной негладкой полубесконечной задачи оптимизации со свободным правым концом траектории в недифференцируемой области $\Omega_k : \{ \theta(M^*, \tau) : \theta(M^*, \tau_k) \in \in \max_{x \in 0, R_1} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{\text{spec}}| \leq \varepsilon^\alpha, \theta_{\text{spec}} = \text{const}, \alpha = \text{const} \}$ воспользуемся

альтернативным методом Э.Я. Рапопорта. Мультипликативная форма допустимого управления (13), (14) с фиксированными заранее функциями $V_{ii}(x, y^*)$ и $V_{iui}(x, y^*)$ распределения значимых УИТ позволяет в упрощенном случае синхронного управления интенсивностью всеми 6-ю симметрично расположенных УИТ $q_{ii}(\tau), q_{iui}(\tau), i = \overline{1, 3}$ отыскивать оптимальное для обеих задач управление $U_{\text{onm}}^{(\beta)}(\tau), \beta = 1, 2, \quad U_{\text{onm}}^{(1)}(\tau) = \arg \min_{U^{(1)}(\tau)} J$, в задаче максимальной точности ($\beta=1$) и

$U_{\text{onm}}^{(2)}(\tau) = \arg \min_{U^{(2)}(\tau)} \tau_k$ в задаче быстродействия ($\beta=2$) в полученной методом моментов

параметрической форме. Таким образом обе задачи сведены к проблеме поиска конечного числа параметров $\Delta_\delta^{(i)}, \delta = \overline{1, 2, \dots, I}; \alpha = \overline{1, 2, \dots, J}$; причем $\Delta_\delta^{(i)}$ - продолжительность δ -го интервала постоянства значений интенсивности (мощности $P_i(\tau) = P_{\text{max}}$ теплоисточников $q_{ii}(\tau) = q_{iui}(\tau) = q_{\text{max}}$) из общего их количества α , на которых каждая компонента вектора $\overline{U}^{(\beta)}(\tau)$ попеременно принимает свои предельно возможные значения на уровне ограничений (16):

$$U_{\text{onm}}^{(\beta)}(\tau) = U_{\text{onm}}^{(\beta)}(\Delta^{(\alpha)} \delta) = \begin{cases} q_{\text{max } i} = \frac{P_{\text{max } i}}{s_t}, \forall i = \overline{1, 6}, \delta = 1, 3, 5 \dots \\ 0, \forall i = \overline{1, 6}, \delta = 2, 4, 6 \dots \end{cases} \quad (18)$$

Продолжительность $\Delta_\delta^{(j)}, j = \overline{1, \alpha}$ и требуемое количество интервалов α , определяется альтернативным методом из системы трансцендентных уравнений:

$$\theta(x_3, \tau_k) \Big|_{\substack{x_3=[0, R_1] \\ y=0, 5R_2 \\ z=0, 5R_3}} = \pm \varepsilon^{(\alpha)}; \quad \frac{\partial \theta(x_3, \tau_k)}{\partial x} \Big|_{\substack{x_3=[0, R_1] \\ y=0, 5R_2 \\ z=0, 5R_3}} = 0 \quad (19)$$

где $\theta(x_3, \tau_k) = \theta(x, y, z, \tau) \Big|_{x=x_3, y=0, 5R_2, z=0, 5R_3, \tau=\tau_k}$ результирующее решение краевой задачи (1) -(3)

вида с параметризованным оптимальным управлением (19), $x_\vartheta \in [0, R_1], \vartheta = 1, 2, \dots, \alpha$ – счетное множество предельных точек из замкнутого множества $[0, R_1] \times \bar{D}_k \subseteq \Omega_\rho \subset E^3$ области определения $M \in \{x: x \in [0, R_1], y: y \in [0, R_2], z: z \in [0, R_3]\}$ $\bar{\Omega}$ функции $\theta(\rho_k, \varphi_k)$, в которых выполняются соотношения (19);

$$\varepsilon^{(\alpha)} = \begin{cases} \varepsilon_{\min}^{(\alpha)} = \min_{U_{\text{don}}^{(1)}(\Delta_\delta^{(\alpha)})} \max_{x \in [0, R_1]} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{\text{spec}}|, \delta = 1, 2, \dots, \alpha, \beta = 1, x = x_\vartheta, \vartheta = 1, 2, \dots, (\alpha + 1), \alpha = 1, 2, \dots, \alpha_{\max} \\ \varepsilon_{\text{don}}^{(\alpha)}, \beta = 2, x = x_\vartheta, \vartheta = 1, 2, \dots, \alpha \end{cases},$$

где $\varepsilon_{\min}^{(\alpha)} = \max \left| \theta \left(\rho, \Delta^{(i)}, \varphi_k \right) \right|$ - предельно достижимое в ходе решения задачи. максимальной точности ($\beta=1$) в классе α -интервальных управлений отклонение $\theta(M^*, \tau_k)$ от заданной величины θ_{spec} . $\varepsilon_{\text{don}}^{(\alpha)}$ -максимально допустимое заданное для решения задачи быстродействия ($\beta=2$) отклонение $\theta(M^*, \tau_k)$ от требуемого θ_{spec} . При этом $\varepsilon_{\text{don}}^{(\alpha)}$ выбирается как ближайший больший член ряда $\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \dots \geq \varepsilon_{\min}^{(\text{inf})}$, где $\varepsilon_{\min}^{(\alpha)}$ - решение задачи максимальной точности ($\beta=1$) в α -параметрическом классе оптимальных управлений. Процедура решения трансцендентной системы (19) осуществляется специально разработанным с участием автора пакетом прикладных программ на основе численного решения уточненной краевой задачи в пакете «ANSYS». На рисунке 18 приведено результирующее температурное распределение для оптимального по точности управления $\beta=1$ для одно- и двухинтервального управления и отклонение от заданной температуры в линии ответственного сечения НК $L^*(x, y = 0.5R_2, z = 0.5R_3)$. Максимальное на этой линии $L(l_x, l_y, l_z)$ отклонение температуры не превышает 4°C при воздействии наиболее тяжелого варианта тепловой нагрузки, что допустимо для рассматриваемого в этом примере варианта функционального назначения КА.

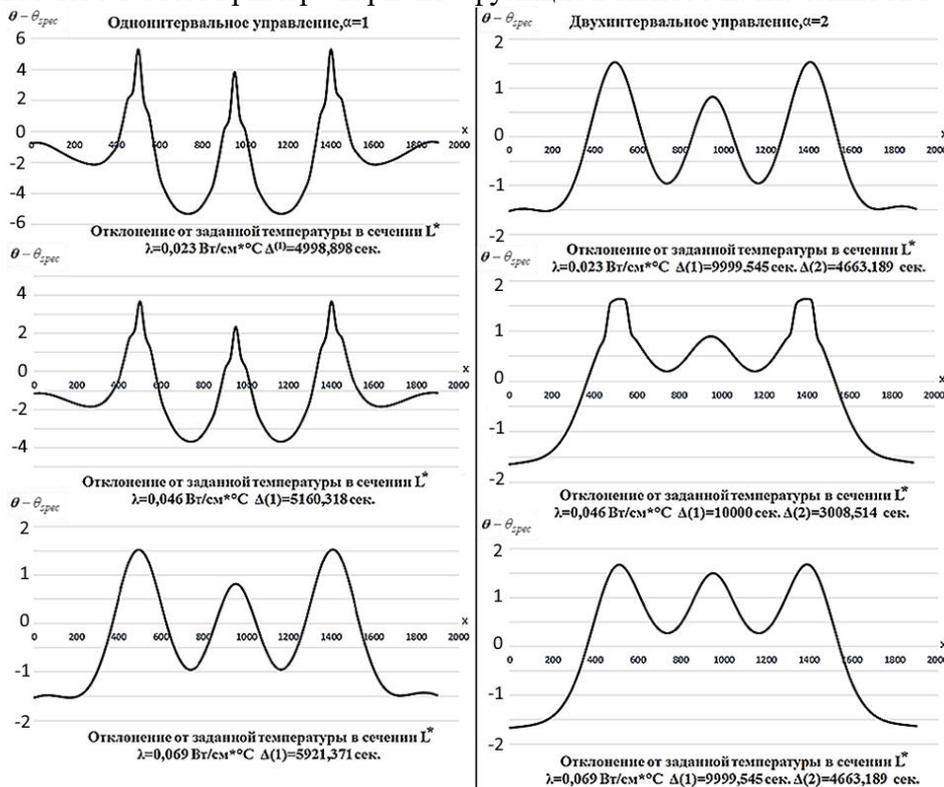


Рисунок 18 - Отклонение $\varepsilon_{\min}^{(\alpha)}$ от заданной температуры на линии сечения $L^*(x, y^*, z^*)$, $y^* = 0,5R_2, z^* = 0,5R_3$ при оптимальном по точности управлении ($\beta=1$)

Особенностью численной процедуры является необходимость автоматизированного выбора из трех кандидатов на точку экстремума (см. рис 18) в определяющей системе (19) альтернативного метода в связи с дискретным распределением УИТ. Зависимость результатов решения оптимальных задач от свойств материала НК- коэффициента теплопроводности λ представлена на рисунках 19 и 20. Полученные результаты просто реализуются бортовыми компьютерами автономных объектов и позволяют сделать вывод, что двухинтервальное ($\alpha=2$) управление в обеих задачах обладает существенно меньшей чувствительностью к коэффициенту теплопроводности λ при существенно более высокой точности приближения к заданной температуре. Это обеспечивает конструктору большую свободу при выборе материала конструкций различного назначения и позволяют снизить термодформационную составляющую измерительной погрешности, не увеличивая чрезмерно количество УИТ.

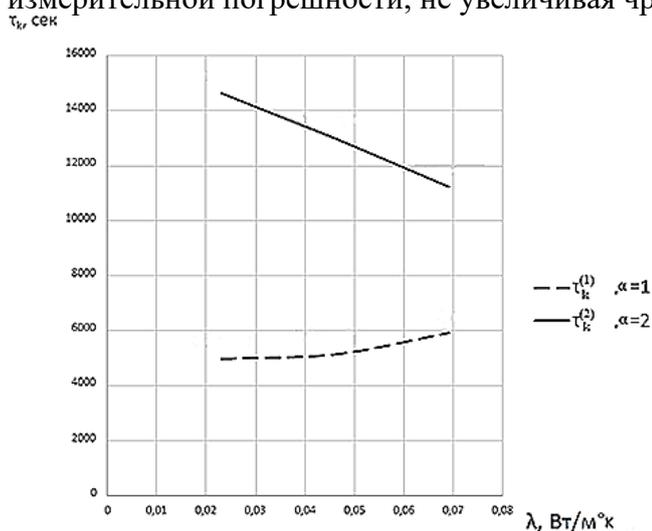


Рисунок 19 - Зависимость времени управления τ_k от коэффициента теплопроводности для одно- и двухинтервального ($\alpha=1, \alpha=2$) управления

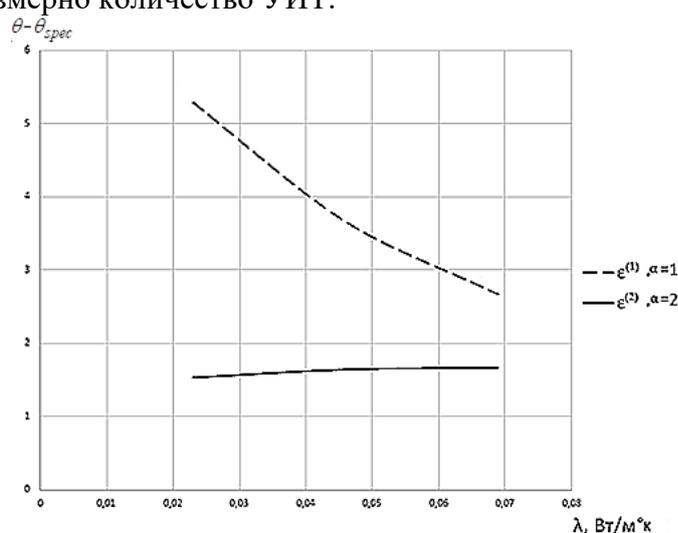


Рисунок 20 - Зависимость достижимой погрешности $\varepsilon_{\min}^{(\alpha)}$ управления от коэффициента теплопроводности для одно- и двухинтервального ($\alpha=1, \alpha=2$) управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в диссертационном исследовании цели достигнуты:

1. Обоснована постановка задачи и сформулирована неявная трехмерная математическая модель нестационарного температурного поля в НК ИИС как объект управления форме линейной краевой задачи в условиях обоснованных допущений
2. Предложена форма явной трехмерной математической модели температурного поля в теплонагруженной НК ИИС КА в виде комбинации одномерных краевых задач теплопроводности.
3. Предложена модификация функционально ориентированной на применение в системах автоматического управления математическая модель температурного поля в неравномерно теплонагруженной несущей конструкции информационно-измерительных систем космического аппарата в форме пространственно-распределенных передаточных функций с учетом распределенности теплоисточников и теплоприемных поверхностей.
4. Разработана супервизорная структура подсистемы управления температурой НК ИИС КА, содержащая локальные САУ температурой контрольных точек НК ИИС КА и эффективные алгоритмы термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС КА (АТСТ).
5. Проведено имитационное моделирование на нелинейной модели в среде «Ansys», свободной, от принятых при разработке АТСТ и САУ, допущений в различных в т.ч. нерасчетных режимах работы КА рассматриваемого типа установлена эффективность обоих алгоритмов и локальных САУ.
6. Установлено, что быстродействие непрерывного АТСТ значительно выше, чем у релейного

(17 сек. И 120 сек. при открытии люков), максимальное значение пиков отклонений температуры от максимально заданного значения ниже у непрерывного алгоритма по сравнению с релейным (6.1 % и 54.3 % при открытии люков). Температурный перепад при открытии люков так же ниже у непрерывного алгоритма (0.27 ед. (0.81 К) и 0.51 ед. (1.53 К) ед. в относительных единицах). Релейный АТСТ требует для своего функционирования значительно меньше бортового энергоресурса, затрачиваемая на термоградиентную стабилизацию средняя мощность для рассматриваемого типа КА в релейном алгоритме ниже, чем в непрерывном в 15 раз.

7. Существенная энергоэффективность релейного АТСТ по сравнению с непрерывным, достигнута за счет снижения качества температурного режима НК. Для удовлетворения требованиям технического задания в рассматриваемом типе КА следует использовать непрерывный алгоритм.

8. Обоснована и поставлена, и решена задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении НК ИИС АО. основе модификации численной процедуры альтернативного метода Э.Я. Рапопорта для группы дискретно распределенных управляемых теплоисточников.

9. Получены предельно допустимые в рассматриваемом классе оптимального управления кондиции температурного поля НК ИИС АО и зависимости оптимального температурного распределения от теплофизических характеристик материала НК ИИС АО, позволяющие реализовать двухинтервальное оптимальное управление, как наименее чувствительное.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в международной наукометрической базе SCOPUS:

1. Livshits, M., Borodulin, B., Nenashev, A., Savelieva, Y. Automatic Compensation of Thermal Deformations of the Carrying Structures of Cyber-Physical Information Measuring Systems Studies in Systems, Mathematical Methods in Technologies and Technics 2021, 2022, 418, Pp. 97–106
2. Livshits, M.Y., Nenashev, A.V., Borodulin, B.B. Efficient Computational Procedure for the Alternance Method of Optimizing the Temperature Regimes of Structures of Autonomous Objects. Cyber-Physical Systems: Industry 4.0 Challenges, Springer International Publishing, 2020, 260, Pp. 79–88
3. Livshits, M., Borodulin, B., Saveleva, Y., Nenashev, A. Distributed Control of Temperature Regimes for Structure Elements of Autonomous Objects Proceedings - 2019 21st International Conference; Complex Systems: Control and Modeling Problems, CSCMP 2019, 2019, 2019-September, Pp. 500–503,
4. Livshits, M.Y., Borodulin, B.B. Comparative Analysis of Optimal Temperature Distributions in the Responsible Sections of Load Bearing Structures. MATEC Web of Conferences, 2017, 110, P. 01015
5. Livshits, M.Y., Borodulin, B.B., Korshikov, S.E. Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects MATEC Web of Conferences, 2016, 92, P. 01053
6. Livshits, M.Y., Borodulin, B.B. Optimal control of temperature modes of the instrumental constructions of autonomous objects EPJ Web of Conferences, 2016, 110, P.01036
7. Borodulin, B.B., Obolensky, A.A. Stabilization of temperature regimes of bearing structures of measuring systems MATEC Web of Conferences, 2015, 23, P.01010

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

8. Бородулин Б.Б. Алгоритм автоматической компенсации термодформаций теплонагруженных несущих конструкций. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. № 4 (72). С. 6-19.

Публикации в других изданиях:

9. Лившиц М.Ю. Автоматическая компенсация термодформаций несущих конструкций киберфизических информационно-измерительных систем / М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин, А.В. Ненасhev, Ю.О. Савельева // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2021. - № 3. - С. 51-54;
10. Лившиц М.Ю. Распределенное управление температурными режимами конструкционных

элементов автономных объектов / М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин, А.В. Ненашев, Ю.О. Савельева // XXI международная научная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах»: в 2-х т. - Том 1. - Самара. - ООО «Офорт». - 2019. - С.349-352;

11. Лившиц М.Ю. Оптимизация температурных распределений в ответственных сечениях несущих конструкций / М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3х томах. - 2018 - С. 148-151;

12. Лившиц М.Ю. Эффективная вычислительная процедура альтернативного метода оптимизации температурных режимов конструкций автономных объектов / М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин, А.В. Ненашев // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2019. - Т. 4. - С. 114-119;

13. Деревянов М.Ю. Системная оптимизация химико-термической обработки деталей / М.Ю. Деревянов, М.Ю. Лившиц, Е.А. Якубович, Б.Б. Бородулин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ 2016, - 2 (84). - С. 26-31;

14. Лившиц М.Ю., Бородулин Б.Б., Оптимальное управление температурными режимами приборных конструкций автономных объектов / М.Ю. Лившиц, Б.Б. Бородулин // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. - 2015. - № 10 (80). - С. 31-34;

15. Бородулин Б.Б. Оптимизация управления температурными режимами космических аппаратов / Б.Б. Бородулин // Тезисы докладов участников Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Космодром «Восточный» и перспективы развития российской космонавтики» - Москва-Благовещенск-Космодром «Восточный»: Издательство БГПУ. - 2015. - С. 25;

Разрешено к печати диссертационным советом

24.2.377.04 (Д 212.217.07)

Протокол №8 от 11.10.2023 г.

Заказ №___. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. №1.

Отпечатано на ризографе. уч.-изд. л. 1,0. Тираж 120 экз.

Самарский государственный технический университет

Типография СамГТУ

443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, Главный корпус