

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Лившиц Михаил Юрьевич

Самара – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ АО.....	10
1.1 Области применения АО	10
1.2 Системы обеспечения тепловых режимов КА	11
1.2 Математическое моделирование, управление и оптимизация тепловых режимов КА	14
1.3 Выводы по первой главе	17
2 ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В НК ИИС КА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ	18
2.1 Тепловая схема НК малого КА.....	18
2.2 Математическая модель температурного поля НК ИИС.....	24
2.3 Выводы по второй главе.....	35
3 СТРУКТУРА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	36
3.1 Функционально ориентированная математическая модель объекта управления в форме передаточных функций	37
3.2 Модификация передаточных функций ОУ	44
3.3 Выводы по третьей главе	52
4 СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ НК ИИС	53
4.1 Обобщенная структура подсистемы управления температурой НК ИИС в составе СОТР КА	53
4.2 Синтез локальной САУ температурой НК ИИС.....	59
4.3 Простейший алгоритм автоматического управления температурой НК ИИС КА	62
4.4 Линейный анализ локальной САУ температурой НК ИИС КА	64
4.5. Моделирование локальной САУ температуры НК ИИС	67
4.6 Выводы по четвертой главе.....	74
5 АЛГОРИТМЫ ТЕРМОГРАДИЕНТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В СОТР КА	75
5.1 Непрерывный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС КА.....	75
5.1.1. Описание непрерывного алгоритма АТСТ НК ИИС КА.....	76
5.2 Релейный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС КА.....	81

5.2.1. Описание релейного алгоритма АТСТ НК ИИС КА	82
5.3 Имитационное численное моделирование управляемых температурных режимов НК.....	86
5.3.1 Штатный режим 1.....	87
5.3.2 Штатный режим 2.....	97
5.3.3 Нештатный режим	101
5.3.4 Нештатный режим 2	106
5.4 Выводы по пятой главе.....	112
6 Оптимальное управление температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции.....	114
6.1 Постановка задачи	114
6.2 Решение задачи оптимального управления распределением температуры в заданном сечении НК ИИС КА.....	117
6.3 Численное решение задачи оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении.....	119
6.4 Выводы по шестой главе.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ.....	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	127
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	138
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	165
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Автономные объекты (АО) находят широкое применение в различных областях: в авиационно-космической отрасли, подводных исследованиях, автомобильном транспорте и т.д. К автономным объектам (АО) будем относить космические аппараты (КА), дроны и другие летательные аппараты, подводные, надводные, беспилотные аппараты и т.п. Малые КА – наиболее представительный класс АО.

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 содержат 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 значительного удаления от объекта измерения, характерного для КА. 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 в экстремальных условиях эксплуатации АО 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. Зарубин 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. Зенкевич 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. Beck, 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. Цаплина, П.К. Кузнецова, Г.П. Аншакова, Я.А. Мостового, R. Schmidt, E. Gustavson, О. 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 в форме 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 в программной среде «Matlab» использованы методы теории систем управления с распределенными параметрами, задачи оптимального управления решены альтернансным методом. Имитационное моделирование производится методами конечных элементов в программной среде «Ansys».

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 при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (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.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ АО

1.1 Области применения АО

Автономные объекты (АО) находят широкое применение в различных областях: в авиационно-космической отрасли, подводных исследованиях, автомобильном транспорте и т.д.

В частности, крупнейшие производители автомобильной индустрии создают полностью автономные транспортные средства. Разработки в этой же области ведет BMW. Компания оснащает свои электрические модели основными полностью автономными функциями с 2021 года. Седан 5-Series нового поколения с системой автономного управления BMW демонстрировала в начале 2017 года. На Мобильном конгрессе в Барселоне BMW показывала совместный с Ericsson и Intel проект автомобиля, подключенного к сети 5G [94]. Одной из наиболее продвинутых компаний в области автопилотируемых автомобилей является Tesla. Бортовая информационно-измерительная система АО распознает сотни элементов: дорожная разметка и знаки, светофоры, пешеходов, другие автомобили и даже смазываемый во время движения фон.

В России и за рубежом ведутся интенсивные фундаментальные и прикладные работы по созданию автономных необитаемых подводных аппаратов, способных решать поставленные задачи. США, Канада, Великобритания и Франция, Норвегия, Япония и Италия в конце 80-х годов 20 века так же активизировали исследования в этой области [80].

Автономные необитаемые подводные аппараты с различной степенью автоматизации, предназначены для поиска и обследования подводных объектов, проведения гидрологических и океанологических исследований, использования в военных целях [120].

Кроме того, широко используются такие виды АО как диагностические роботы для трубопроводов, аппараты для бытового использования (роботы-уборщики) и т.п. К АО относятся также летательные аппараты (дроны), наблюдения и сбора информации.

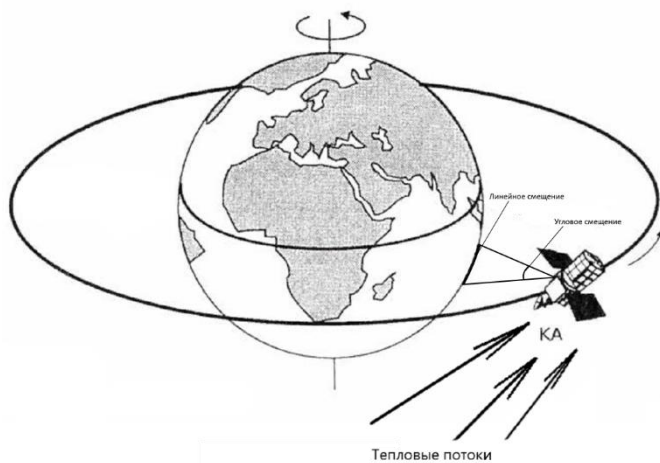
Типичными представителями автономных объектов являются космические аппараты (КА), именно в них в наиболее выраженной форме сосредоточены основные особенности АО.

Космические аппараты представляют собой сложные АО, функционирующие в особо тяжелых, экстремальных условиях работы. В частности, такими аппаратами являются спутники с телекоммуникационными системами, оснащенные оптическими измерительными приборами. При этом наличие экипажа на борту КА не устраняет проблем, связанных с его автономностью, т.к. эти проблемы определяются сложностью, а зачастую недоступностью энергетических, материальных и информационных коммуникаций.

Функционирование бортовых систем АО в существенной степени зависит от качества измерительной информации, полученной путем измерений. Значительную долю в общей измерительной информации составляет информация, полученная от оптических компонент ИИС. Оптические системы (ОС) в КА широко используются в различных областях. В основном ОС используются в фоторазведке, астрономических и геодезических наблюдениях. В коммерческой сфере количество спутников зондирования поверхности Земли растет. Космические снимки могут иметь низкое (более 10 м), среднее (от 10 до 2,5 м), высокое (от 2,5 до 1 м), и сверхвысокое (менее 1 м) разрешение. С увеличением разрешающей способности растут и весогабаритные показатели ОС КА, что увеличивает стоимость полученной с её помощью информации, а значит и увеличивает возможный ущерб от её недостоверности. Область применения КА с ОС не ограничивается наблюдением за земной поверхностью. Также существуют автономные системы наблюдения за Солнцем, Луной и планетами (Венера, Марс и т.д.) [37]. Большое количество известных российских и зарубежных организаций занимаются производством и сопровождением космических аппаратов с оптическими системами, известно более 60 основных моделей КА [9, 30, 88, 123-124].

1.2 Системы обеспечения тепловых режимов КА

На качество изображения ОС КА влияет большое число воздействий, как внешних, так и внутренних технологических. К внешним, например, можно отнести магнитные свойства атмосферы, тепловые воздействия планет и светил. Технологические — это погрешности сборки, деформации при неравномерном выводе КА на орбиту, тепловыделения ИИС и т.п. Во время эксплуатации КА ряд источников абберации, приводит к искажению полученного результата оптических измерений [33, 92]. Тепловой режим КА является существенным фактором, влияющим на абберацию (см. рис. 1.1).



Под воздействием внешних тепловых возмущений - прямое и отраженное от планет солнечное теплоизлучение, влияние космического вакуума при открывании люков и т.п. и внутренних тепловых возмущений - тепловыделение при работе функциональной аппаратуры, размещенной на НК КА, температура в отсеках КА и на НК отклоняется от требуемой. Для обеспечения необходимого

теплового режима в случае незначительных внутренних тепловыделений используются пассивные методы его обеспечения в форме теплозащиты или полупассивные методы с использованием, например, тепловых труб и т.д. При этом требуется определенное размещение теплонагруженных элементов внутри КА с целью обеспечения достаточно равномерного температурного распределения.

В настоящее время усиливаются требования к разрешающей способности ОС КА. Эти требования в свою очередь накладывают ограничения на рабочий диапазон температур ОС КА. Повышенной разрешающей способностью и точностью определения координат объектов должны обладать оптико-электронные комплексы (ОЭК) КА нового поколения, призванные обеспечить поиск и спасание потерпевших аварию морских, воздушных и сухопутных объектов. Это же относится к использованию КА для решения задач топографии, геологии, сельского и лесного хозяйства, обеспечения экологической безопасности и контроля соблюдения международных договоров в области вооружения. Повышение качества снимаемой информации осуществляется на основе методов многокритериальной и многоцелевой оптимизации НК ОЭК КА, их термоградиентной стабилизации [45, 101, 105]. В 2008 году компания DigitalGlobe (США) и ее дистрибьютор компания «Совзонд» (Россия) начали коммерческое распространение новейших сервисов ImageConnect и ImageBuilder, позволяющих обеспечить мультипользовательский доступ к высокоточным данным со спутников QuickBird и WorldView-1 непосредственно из геоинформационной среды предприятия. Мультиспектральная съемка сверхвысокого разрешения территории Российской Федерации в целом и по регионам за период 2009–

2011 гг. и с начала съёмочного сезона 2012 г. проводилась со спутников WorldView-2, QuickBird и GeoEye-1. В проекте создания спутников участвуют такие компании как Ball Aerospace (платформа, интеграция), Eastman Kodak (оптическая камера), ИТТ (интеграция), BAE Systems (система обработки). В 2009–2011 гг. было отснято около 10 млн кв. км, что составляет 60% площади нашей страны.

Для обеспечения требуемого теплового режима, КА снабжены системой обеспечения теплового режима (СОТР).

Проблема влияния тепловых режимов на работу ИИС АО исследована в работах [25, 28, 45, 59, 60, 93]. Вопросы теплообмена в космосе описаны О.Н. Фаворским и Я.С. Каданером [82].

В 1990 году была опубликована обзорная работа, где были вычислены термоабберации для отдельных тепловых режимов КА. [57]. Имеется также ряд работ, выполненных в 80-е годы в основном сотрудниками ГОИ им. С. И. Вавилова, посвященных отдельным вопросам, связанным с вычислением термоаббераций: исследованы свойства термохроматических аббераций [20], предложен метод расчета тепловых деформаций линз [79].

В ряде публикаций, включая патенты, описаны способы, направленные на компенсацию термдеформаций НК ОЭК КА при эксплуатации. Часть этих способов предполагает компенсацию деформаций НК с помощью силовых активаторов, воздействующих на зеркала [97, 100, 108, 122] или элементы НК [121]. В других способах предполагается осуществление перемещений оптических деталей [22, 96, 117]. В АО ЛОМО разработано фотоэлектронное устройство для настройки оптической системы [22].

Другое направление – конструктивные способы обеспечения размерной стабильности НК ОЭК в неоднородном температурном поле путём специальной, конструктивной разработки ОЭК [34, 90, 91] или путем применения соответствующих материалов [119]. В АО «РКЦ «Прогресс» разработаны термостабильные НК силовой фермы и силового корпуса для космического телескопа [90, 91]. В НПО им. С.А. Лавочкина предложена НК размерностабильной оболочки [34].

Снижение влияния термоаббераций осуществляют также за счёт создания оптических схем, компенсирующих соответствующие воздействия [44, 69, 118].

В подавляющем большинстве современных КА, включая малые КА (МКА), работающих на орбите Земли в качестве АО, используются активные методы обеспечения теплового режима, включая обеспечение равномерного температурного на НК ИИС. В этом случае используются различные методы управления локально распределенными на НК теплоисточниками и локальным жидкостным охлаждением НК.

До недавнего времени в РФ применялись СОТР исключительно на основе жидкостных систем с теплоносителем и тепловых трубах, а также их комбинация [35, 36, 61, 82].

В настоящее время для коррекции неравномерности температурного поля НК КА, снижения термодформаций и уменьшения соответствующей погрешности ИИС, в СОТР широко используются электрические управляемые теплоисточники (УИТ) [85]. Отличительными особенностями таких СОТР являются высокая точность поддержания температур оптических элементов, небольшие массогабаритные характеристики и низкое энергопотребление по сравнению с традиционными системами. Математическое моделирование и экспериментальные исследования КА с прецизионной СОТР подтвердило ее высокую эффективность [86, 87].

1.2 Математическое моделирование, управление и оптимизация тепловых режимов КА

Достаточно подробное изложение проблем управления КА вообще и управления СОТР КА в частности, а также методов их решения имеется в работах таких авторов как Петров Б.Н., Малоземов В.В., Петров Г.И., Викулов А.Г., Н.С. Кудрявцева, В.С. Финченко, О.М. Алифанов, С.В. Резник, А.В. Ненарокомов, П.В. Просунцов [4, 5, 18, 19, 46, 39, 45, 60, 72, 110]

В работе [88] рассмотрены вопросы расчета, исследования и анализа СОТР КА методами компьютерного математического моделирования. Разработаны принципы выбора проектных параметров с применением методов оптимизации.

Для управления УИТ СОТР применяются различные системы автоматического управления (САУ), которые, как правило, построены как многопозиционные релейные системы и не обладают достаточной точностью и гибкостью. Кроме того, они не обеспечивают равномерного температурного распределения в НК МКА при глубоких возмущениях как внешних, так и внутренних. Характеристики космической среды, которые могут прямо или косвенно влиять на тепловое состояние космического аппарата

рассмотрены в работе [36]. Управление жидкостным охлаждением сводится к регулированию степени подмеса охлажденного в радиаторах теплоносителя в трубопровод с целью стабилизации его температуры в контролируемой зоне.

Для синтеза автоматически управляемой СОТР требуется математическое моделирование температурного распределения в соответствующих отсеках АО вообще и КА, в частности, а также температурного поля в НК, на котором размещена ИИС, содержащая оптические приборы.

В работах Балтийского государственного технического университета и Санкт-Петербургского политехнического университета в 1997-2001 годах построена линеаризованная математическая модель теплового состояния оптической системы для исследования влияния теплового режима на качество изображения [53- 58, 112].

В выполненной в ЛОМО работе рассматриваются результаты работы СОТР [77], влияющие на пространственное положение оптических компонентов.

Вопросу вычисления термоаббераций посвящено довольно много публикаций. Первыми работами в области термоаббераций выполнены в ГОИ им. С. И. Вавилова [20, 23].

Методы многокритериальной оптимизации различных НК разрабатывались в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН [84, 87] и Нижегородском госуниверситете им. Н.И. Лобачевского [7, 47].

Вопросы проектирования и аналитические методы решения задач оптимизации ОС исследовались в СПбНИУ ИТМО [131, 97]. В настоящее время большинство практических задач оптимизации ОС решаются численными методами с использованием профессиональных специальных программных средств.

Теоретическая основа численного решения задач оптимизации в настоящее время хорошо разработана, однако большое количество параметров в многокритериальной задаче управления и оптимизации СОТР КА требует больших затрат ресурса на определение оптимальных решений с помощью соответствующего специального программного обеспечения.

Исторически сложилось два направления в создании программ для численных методов многокритериальной оптимизации. Первое направление реализуется крупными разработчиками САЕ-систем и состоит во включении в свой программный продукт (ANSYS [126], ABAQUS [133], NASTRAN [131], ZEMAX и др.) модулей оптимизации

[63, 95]. Второе направление реализуется компаниями разработчиками, которые создают отдельные программные продукты для оптимизации, имеющие интерфейсы не только к CAE-системам, но и другим источникам данных (IOSO [130], modeFRONTIER [129]). В последние годы наблюдается конвергенция вышеуказанных направлений, поскольку лидеры рынка CAE-систем предпочитают покупать готовые решения по оптимизации и включают их в свои продукты (optiSLang, Isight [125, 127, 128, 135]).

Основные программные пакеты, используемые для оптимизации ОС –ZEMAX (разработка корпорации Radiant Zemax, LLC, США) [132] и CODE V (фирмы Synopsys, Inc., США) [134].

По заказу НАСА компания Sigmadyne Inc. разработала методологию и реализующую её компьютерную программу междисциплинарной оптимизации OptiOpt [99, 107]. В ней задачи теплопроводности и деформирования решаются вместе, обеспечивая при этом несколько эксплуатационных показателей оптической системы.

В Самарском государственном техническом университете под руководством Я.М. Клебанова [33] выполнена серия НИОКР, содержащих полный интегрированный термооптикодеформационный анализ ОЭК КА для АО. Для решения задач нелинейной теплопроводности в условиях лучистого теплообмена и термоупругости разработана и реализована иерархическая схема численного моделирования температурных полей в НК ОЭК на основе метода конечных элементов. Численно решалась и оптическая задача. Выполнены постановка и решение краевых задач теплопроводности и деформирования, разработаны соответствующие математические модели, созданы соответствующие программные макросы для программного пакета CAE ANSYS, выполнено моделирование распространения и преобразования световых пучков с учётом перемещений и деформаций оптических деталей ОЭК, предложена новая система управления СОТР, разработано соответствующее математическое и программно-алгоритмическое обеспечение для управления СОТР. Показано, что полученные результаты позволяют перейти к постановке и решению комплексной оптимальной задачи термоградиентной и оптико-механической стабилизации и обеспечить в условиях существующих ограничений наилучшее из возможных решений в смысле заданного критерия. В СамГТУ сложилась научная школа профессора Э.Я. Рапопорта, разработавшая эффективные методы аналитического решения оптимальных краевых задач теплофизики на базе альтернативного метода оптимизации [69].

Отличительной характеристикой работ, выполненных в СамГТУ, является то, что в них наряду с совершенствованием НК ОЭК решалась задача разработки СОТР и управления этой системой.

Известны работы Лившица М.Ю., Савельевой Ю.О. [41] по автоматическому управлению температурным режимом НК КА с помощью изменения мощности УИТ и температуры теплоносителя системы жидкостного охлаждения. Однако эти работы ограничиваются управлением температурой на линии выбранного ответственного сечения НК. При этом в случае изменения режима работы тепловыделяющей ИИС или изменения ориентации КА, ответственное за термоградиентную деформацию сечение может измениться, что потребует изменения алгоритма управления. Проблема управления всем температурным распределением НК КА в этих работах не решена, а также не рассмотрены вопросы оптимального управления температурой НК КА.

Разработка системы автоматического управления температурой НК путем изменения мощности размещённых на ней УИТ предполагает наличие математических моделей температурного распределения.

1.3 Выводы по первой главе

Анализ современного состояния в области моделирования и управления температурой АО, несущих конструкций ИИС КА показывает, что несмотря на большое количество научных работ и патентов в этой области, проблема эффективного снижения термоградиентной составляющей погрешности измерений, особенно оптических, не решена к настоящему времени. что делает актуальной разработку эффективных функционально-ориентированных математических моделей и систем управления температурным состоянием НК КА.

2 ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В НК ИИС КА КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Тепловая схема НК малого КА

Общий вид рассматриваемой НК малого КА в сборе приведен на рисунке 2.1.

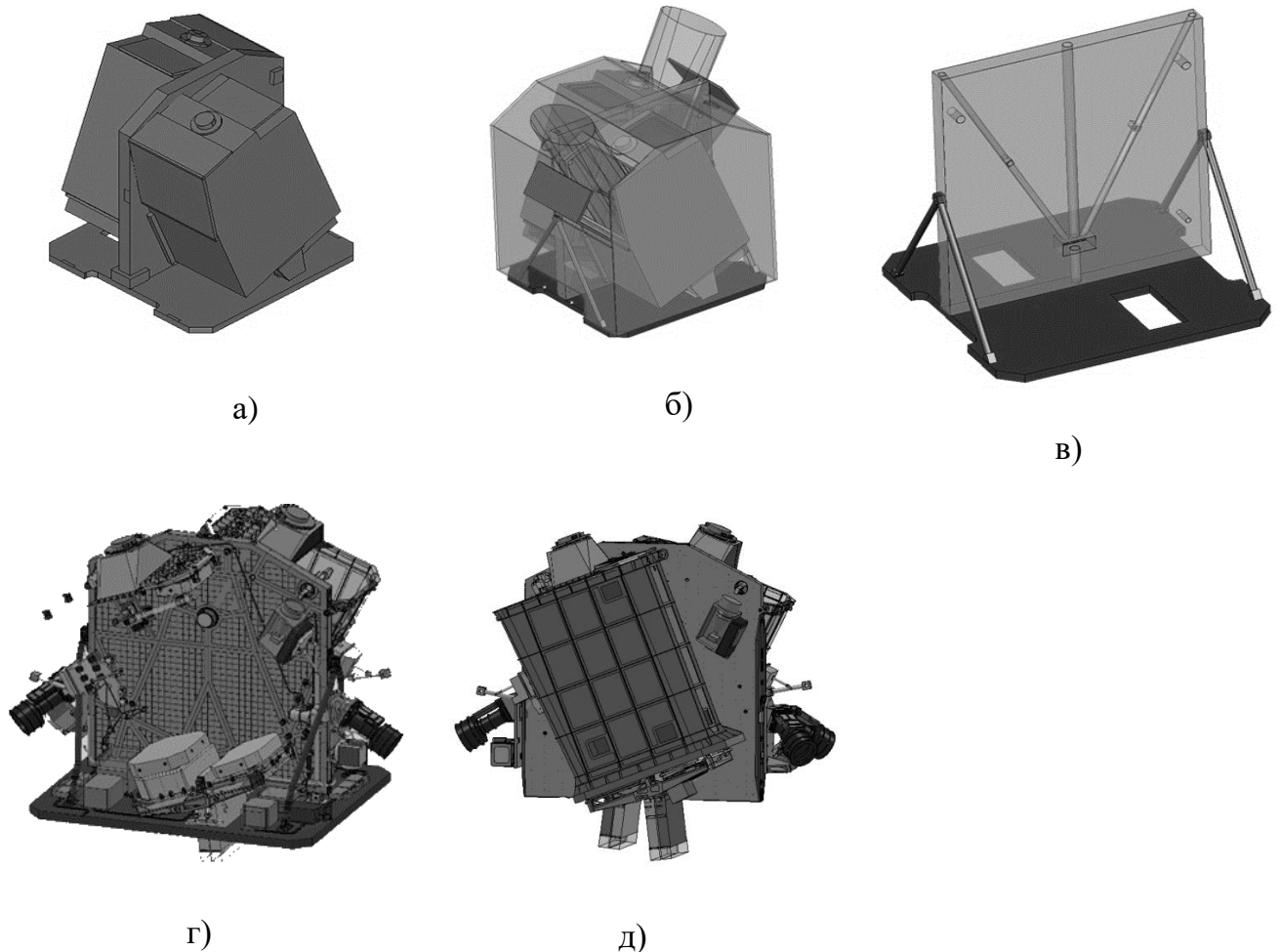


Рисунок 2.1 – Общий вид отсека малого КА

а) отсек КА в кожухе; б) размещение аппаратуры в отсеке КА;

в) крепление НК; г) размещение ИИС на НК; д) НК ИИС отсека КА в сборе

НК ИИС размещается в термостабилизированном кожухе (см. рис. 2.1). В кожухе на время работы оптических приборов ИИС открываются люки, через которые на НК попадает отраженное или прямое излучение космических объектов (планет, светил и т.п.) которые оказывают влияние на НК ИИС.

На рисунке 2.2 представлена НК ИИС КА.

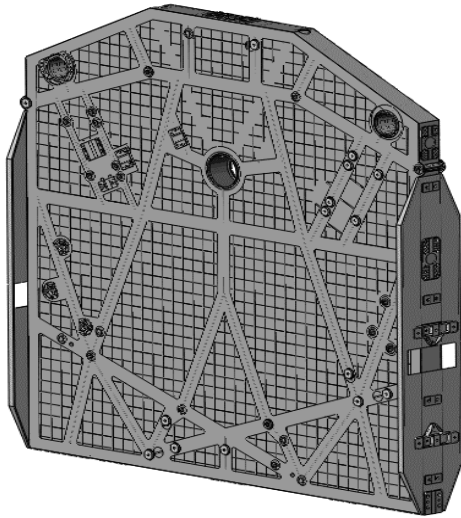


Рисунок 2.2 – НК ИИС КА

- от периодически включаемой аппаратуры: Pld1, Pld2, Pa, Pb, Pr1, Pr2, Pr3, Pr4, Pru1, Pru2, Pru3, Pru4, Pp1, Pp2.

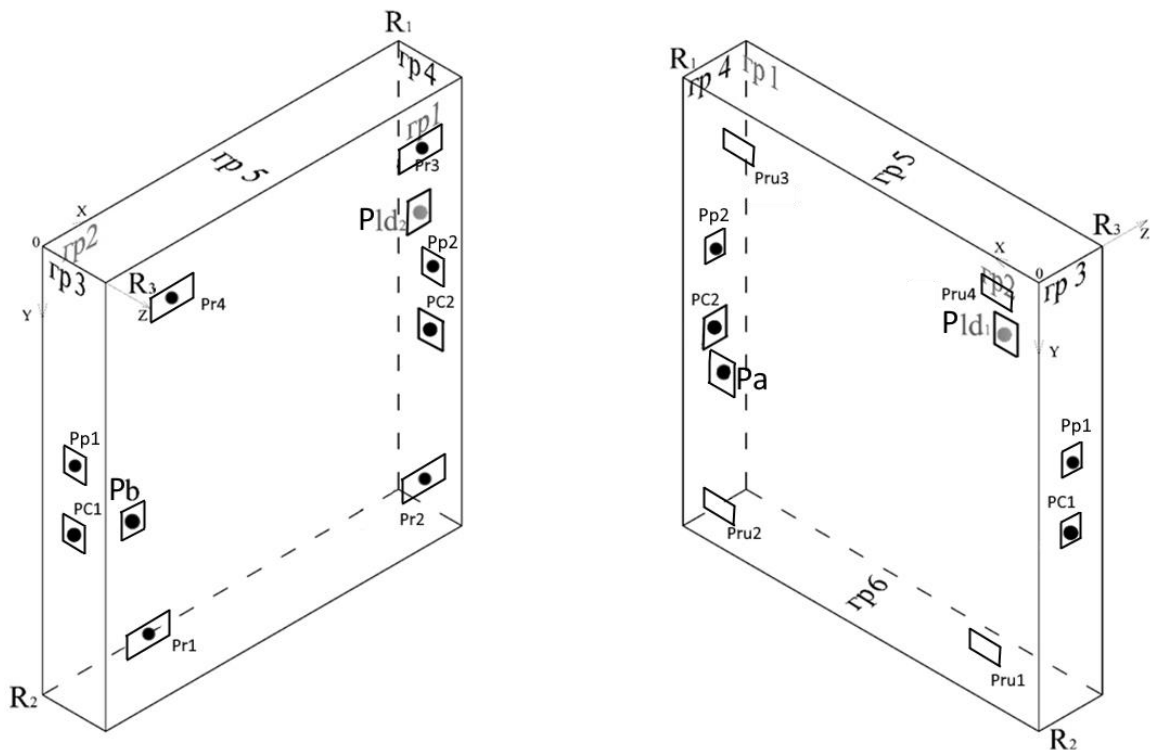


Рисунок 2.3 – Расчетная тепловая схема воздействия тепловыделяющей аппаратуры

ИИС от постоянно работающей и периодически включаемой аппаратуры.

Для стабилизации размеров НК КА и минимизации ее возможной термодформации в условиях нестационарной и неравномерной тепловой нагрузки, используется система

Тепловыделения от функционирующей бортовой аппаратуры ИИС, располагаемой на НК, имеющей форму, близкую к прямоугольной призме (плите) (рис. 2.2) и воздействующие непосредственно на ее температурное поле, подразделяются на тепловыделения (рис. 2.3):

- от постоянно работающей аппаратуры PC1, PC2.

автоматического управления (САУ) температурного поля НК, с использованием соответствующих средств термоградиентной стабилизации (СТГС).

Управляющий элемент СТГС – управляемый теплоисточник (УИТ) представляет собой теплорассеивающую подложку, на которую крепятся пленочные УИТ и термодатчики [40].

На рисунке 2.4 показаны места расположения УИТ на НК. Количество и место установки элементов УИТ определяется из условия возможности обеспечения достаточно равномерного распределения температуры по объему НК в заданных диапазонах в условиях неконтролируемого воздействия на нее внешних и внутренних концентрированных потоков тепла.

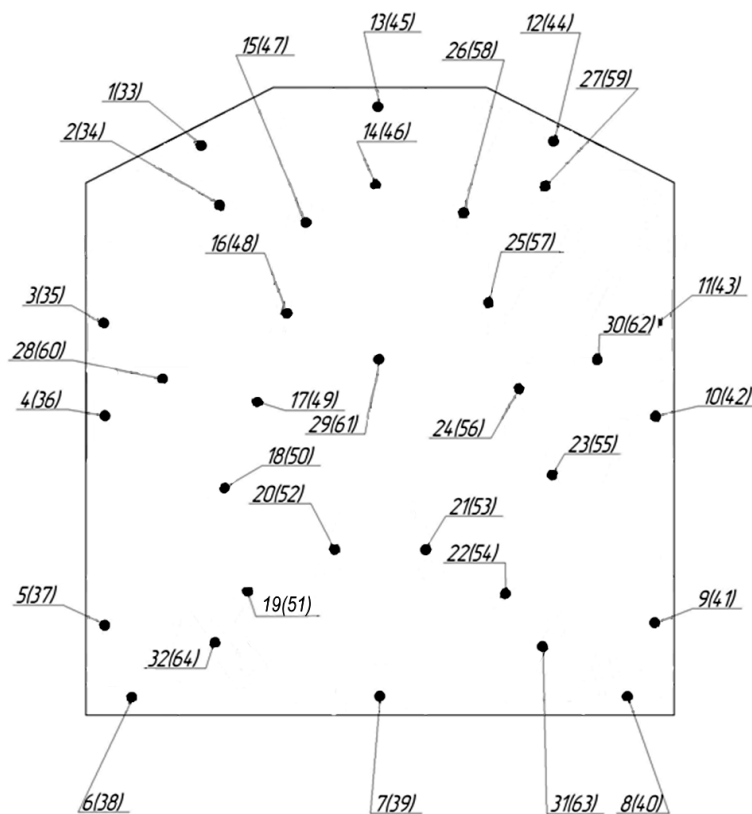
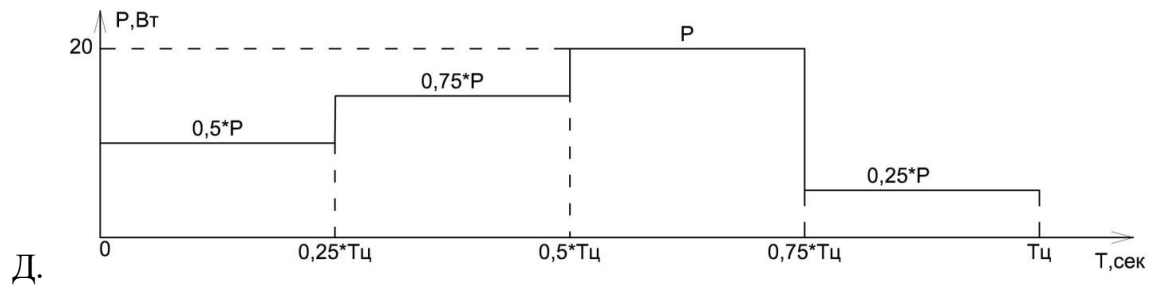
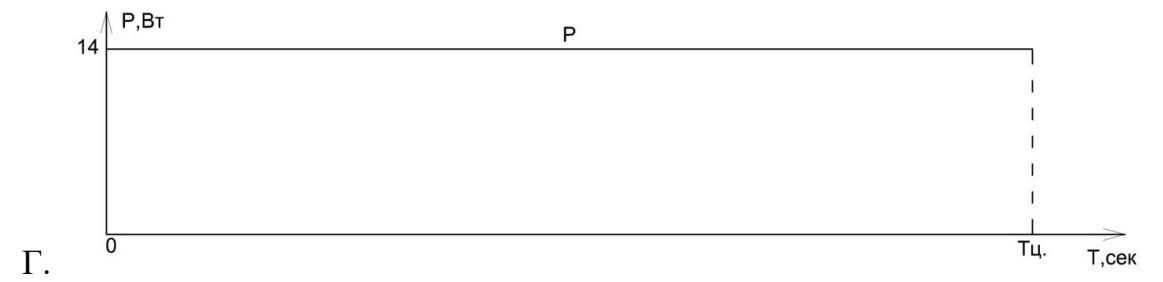
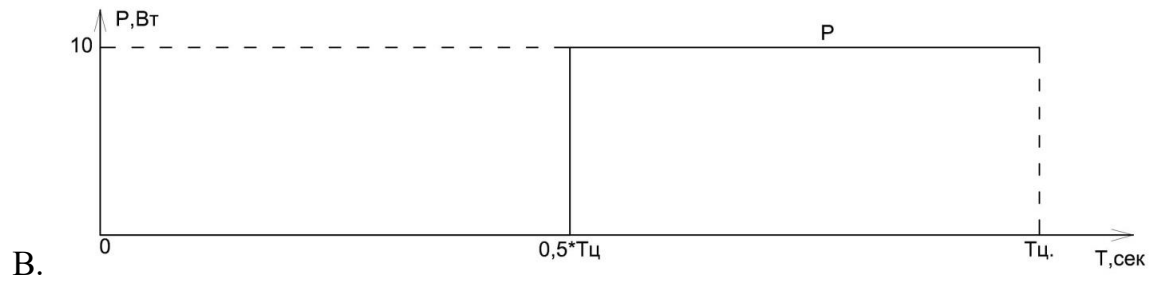
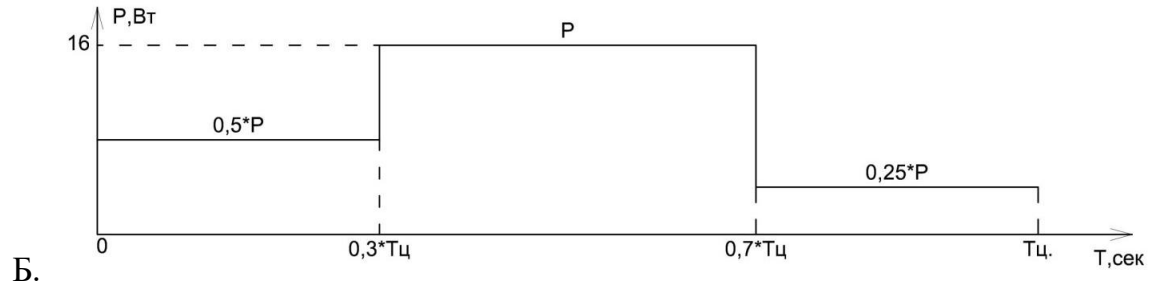
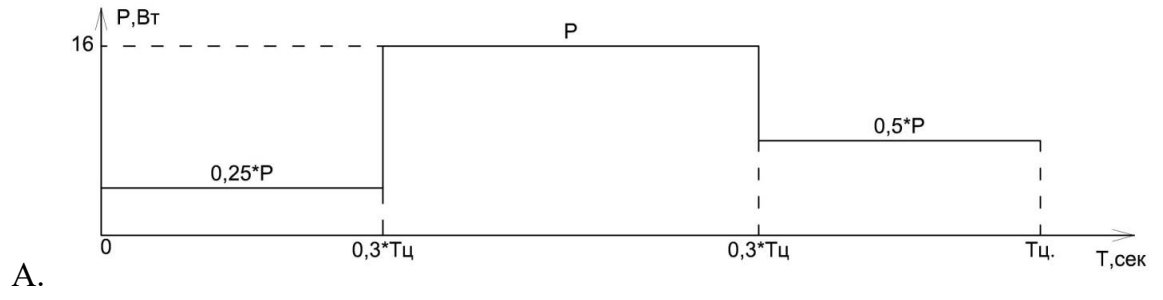


Рисунок 2.4 –Размещение УИТ на поверхности грани 1 (gg1) НК

В скобках указаны номера УИТ, располагающихся на противоположной грани 2 (gg2) НК

На рисунках 2.6 - 2.10 приведены схемы размещения на гранях Гр1-Гр6 НК ИИС КА тепловыделяющей аппаратуры, работающей по определенным циклограммам (см. рис. 2.5), а также других элементов, влияющих на теплопередачу в НК, таких как соединительные элементы НК с КА и т.д.



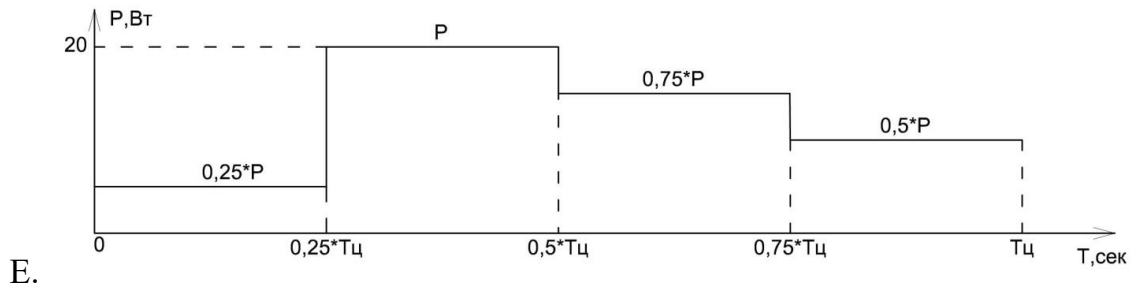


Рисунок 2.5 – Циклограммы работы приборов ИИС

А. - Циклограмма изменения мощности приборов Pr1-Pr4, Б. - Циклограмма изменения мощности приборов Pr1-Pr4, В. - Циклограмма изменения мощности приборов Pa, Pb, Pld1, Pld2, - Г. Циклограмма изменения мощности приборов PC1, PC2, Д. - Циклограмма изменения мощности прибора Pr1, Е. - Циклограмма изменения мощности прибора Pr2

В принятой в диссертации системе координат тепловыделяющие приборы ИИС на НК расположены в соответствии с представленными на рисунках 2.3, 2.6 – 2.10 схемами.

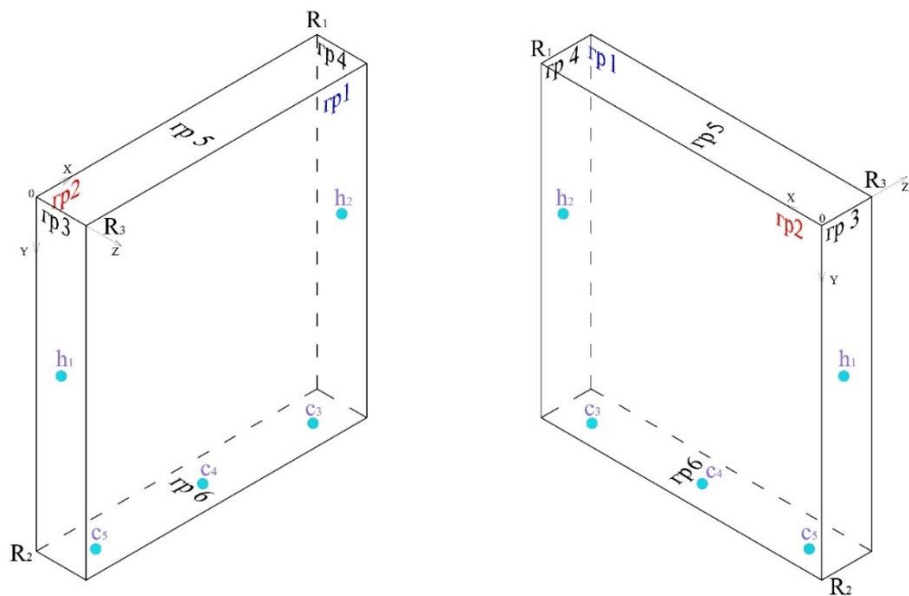


Рисунок 2.6 – Расчетная тепловая схема теплообмена узлов крепления НК (h_1 , h_2 , c_3 , c_4 , c_5) с НК КА

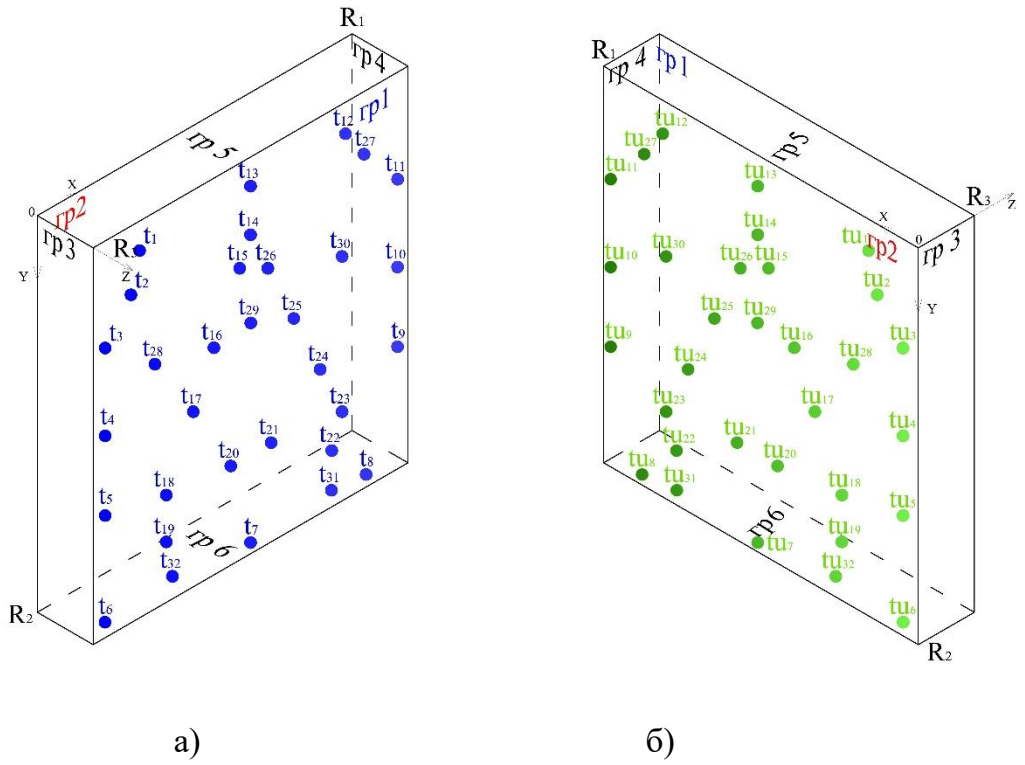


Рисунок 2.7 – а) Расчетная тепловая схема расположения установленных на грани Гр1 УИТ и точек контроля №№1-32, б) установленных на грани Гр2 УИТ и точек контроля №№33-64

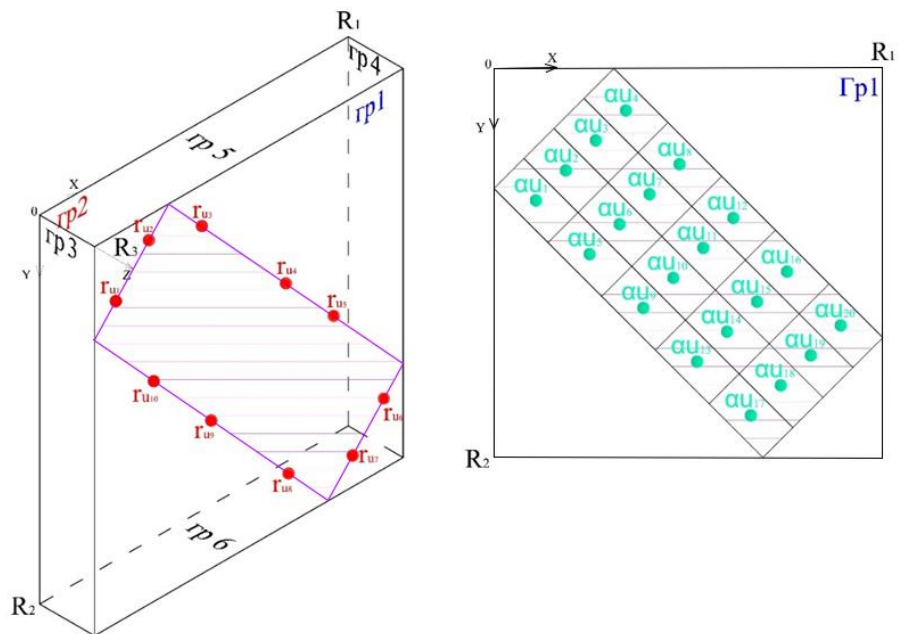


Рисунок 2.8 – Расчетная схема теплового влияния корпуса оболочки НК на грань Гр1

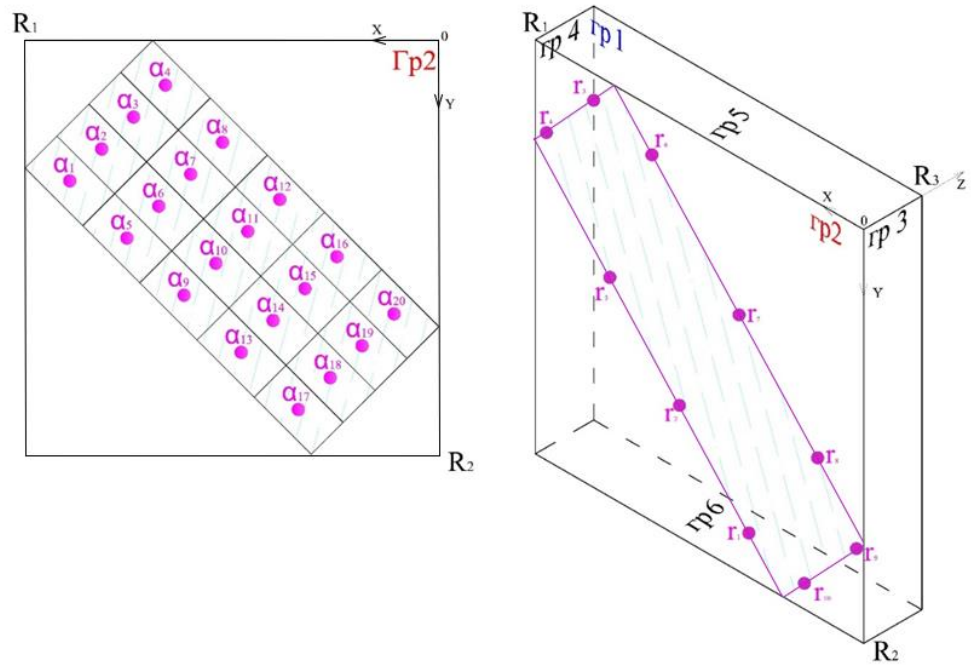
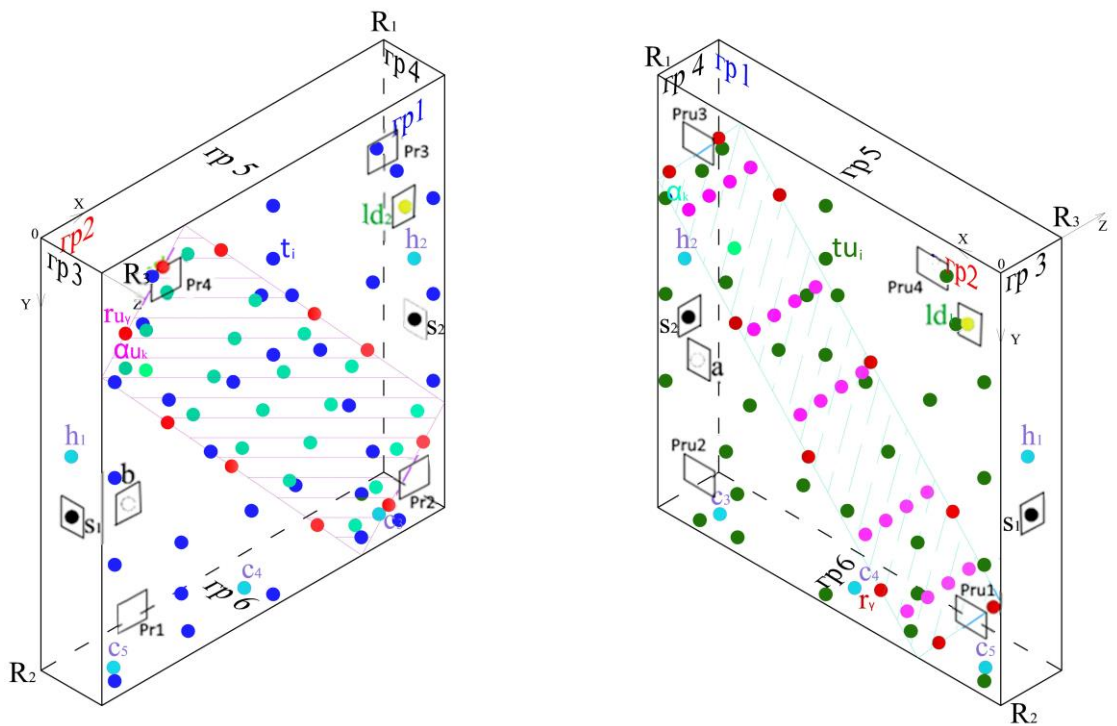


Рисунок 2.9 – Расчетная схема теплового влияния корпуса оболочки НК на грань Гр2



синий, зеленый - точки контроля температуры

Рисунок 2.10 – Общая тепловая расчетная схема расположения теплоисточников на НК

2.2 Математическая модель температурного поля НК ИИС

Создание САУ температурным полем НК в качестве подсистемы СОТР предполагает использование функционально ориентированных на использование в системах управления математических моделей (ФОМ) температурного режима НК. Такие

модели позволяют определить структуру и ориентировочные значения параметров САУ, которые затем уточняются в ходе имитационного моделирования на более точной детализированной численной математической модели.

НК (см. рис. 2.1) представляет собой композитную армированную конструкцию в форме плиты. Ее теплофизические и механические характеристики неоднородны в различных направлениях из-за укладки волокон материала, из-за расположения арматуры и т.д.

Однако для приближенного моделирования объекта управления достаточно считать материал НК изотропным с постоянной плотностью, а механические и теплофизические характеристики постоянными и при анализе теплопроводящих свойств материала принимать такими же как усредненные свойства связующего материала НК. Для построения математической модели объекта управления (ММ ОУ) температурного распределения КА введем ряд дополнительных допущений и упрощений:

Температура среды $T_{sr}(\tau)$ внутри термостабилизированного кожуха составляет в среднем $\tilde{T}_{sr}(\tau) \approx \tilde{T}_{ном} = 292K$.

Максимальная мощность элемента УИТ $P_{max} = 30Вт$.

НК в теплотехническом смысле будем представлять сплошной призмой. Размеры НК по осям x, y, z $R_1 = 1.914 м$, $R_2 = 2.044 м$, $R_3 = 0.093 м$.

Материал НК будем предполагать изотропным с постоянными теплофизическими характеристиками: коэффициент теплопроводности $\lambda = 2,3 \left[\frac{Вт}{м \cdot К} \right]$, теплоемкость $c = 1,48 \cdot 10^{-3} \left[\frac{Дж}{кг \cdot К} \right]$, плотность $\rho = 1440 \left[\frac{кг}{м^3} \right]$.

Внешние потоки собственного и отраженного излучения небесных тел будем предполагать равномерно распределенными по соответствующей опорной площадке.

Температура $T_{изл_{gg}}(\tau)$, шести внутренних поверхности $gg = gg_1 - gg_6$ кожуха циклически изменяется по соответствующим циклограммам (см. таблицу 2.1) в небольших пределах dT_{gg} относительно своего номинального значения $T_{ном_{gg}}$, в зависимости от высоты орбиты и положения КА на каждой $gg = gg_1 - gg_6$ из шести граней НК в соответствии с углом $\varphi = \omega\tau$, где ω – угловая орбитальная скорость КА.

Таблица 2.1 – Циклограммы внутренней поверхности кожуха

Грань, gg	$T_{НОМ\,gg}$	dT_{gg} , К	$T_{у3л\,gg}(\tau)$
Гр1(gg_1)	$T_{НОМ\,gg_1} = 296\text{ К}$	$dT_{gg_1} = 2\text{ К}$	$T_{у3л\,gg_1}(\tau) = T_{НОМ\,gg_1} + dT_{gg_1} \cdot \cos(\varphi)$
Гр2(gg_2)	$T_{НОМ\,gg_2} = 290\text{ К}$	$dT_{gg_2} = 2\text{ К}$	$T_{у3л\,gg_2}(\tau) = T_{НОМ\,gg_2} + dT_{gg_2} \cdot \cos(\varphi)$
Гр3(gg_3)	$T_{НОМ\,gg_3} = 292\text{ К}$	$dT_{gg_3} = 2.5\text{ К}$	$T_{у3л\,gg_3}(\tau) = T_{НОМ\,gg_3} + dT_{gg_3} \cdot \cos(\varphi + 90)$
Гр4(gg_4)	$T_{НОМ\,gg_4} = 292\text{ К}$	$dT_{gg_4} = 2.5\text{ К}$	$T_{у3л\,gg_4}(\tau) = T_{НОМ\,gg_4} + dT_{gg_4} \cdot \cos(\varphi - 90)$
Гр5(gg_5)	$T_{НОМ\,gg_5} = 292\text{ К}$	$dT_{gg_5} = 2.5\text{ К}$	$T_{у3л\,gg_5}(\tau) = T_{НОМ\,gg_5} + dT_{gg_5} \cdot \cos(\varphi)$
Гр6(gg_6)	$T_{НОМ\,gg_6} = 294\text{ К}$	$dT_{gg_6} = 0.5\text{ К}$	$T_{у3л\,gg_6}(\tau) = T_{НОМ\,gg_6} + dT_{gg_6} \cdot \cos(\varphi)$

Для приближенного определения структуры и параметров САУ в ММ ОУ предполагается точечная концентрация теплоисточников и термодатчиков, что допустимо в условиях малости их размеров по сравнению с размерами НК. В уточненных расчетах учитываются реальные размеры теплоисточников и термодатчиков с равномерным распределением теплового потока на площадке контакта теплоисточника с НК.

Для достаточно малых отклонений от установившегося режима в ММ ОУ используется аппроксимация граничного теплообмена НК с кожухом по закону Стефана-Больцмана [2, 8, 43]

$$q_{gg}(\tau) = \sigma_{gg} \left[T^4 |_{\Gamma p_{gg}} - T_{у3л\,gg}^4 \right], \quad gg = \overline{gg_1, gg_6} \quad (2.1)$$

эквивалентным граничным теплообменом по закону Ньютона, $T_{sr_{gg}}(\tau) = T_{у3л\,gg}(\tau)$

$$q_{gg}(\tau) \approx \alpha \left[T(\tau) |_{\Gamma p_{gg}} - T_{sr_{gg}}(\tau) \right], \quad gg = \overline{gg_1, gg_6} \quad (2.2)$$

Здесь $\alpha = 0,75 \left[\frac{Вт}{м^2 К} \right]$ - эквивалентный коэффициент теплоотдачи, $\sigma_{gg} = \xi \sigma$ -

приведенный коэффициент лучеиспускания на грани $gg = \overline{gg_1, gg_6}$ $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴ - постоянная Стефана-Больцмана, $\xi = 0.91$ - степень черноты внутренней поверхности кожуха; $T(\tau) |_{\Gamma p_{gg}}$ - средняя температура поверхности gg-й грани НК, $gg = \overline{gg_1, gg_6}$; $T_{у3л\,gg}(\tau)$ - температура внутренней поверхности кожуха параллельной gg грани, $T_{sr_{gg}}(\tau) = T_{у3л\,gg}(\tau)$ - температура окружающей НК среды, принимается равной средней температуре $T_{у3л\,gg} = T_{НОМ\,gg}$ внутренней поверхности кожуха. Перекрестным излучением

при построении ММ ОУ пренебрегаем. Космические тепловые потоки через открытые люки кожуха считаем усредненно постоянными на время открытия люка.

В дальнейшем в ходе верификации разработанных на основе ММ ОУ алгоритмов управления и для идентификации ММ ОУ будем использовать уточнённую математическую модель на базе конечно элементной аппроксимации в среде ANSYS трехмерной нелинейной краевой задачи распространения тепла в анизотропной композитной НК [92], свободную от большинства принятых выше допущений.

$$c_p(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda(T) \cdot \operatorname{grad} T(x, y, z, \tau)), \quad (2.3)$$

$$x \in D_x, y \in D_y, z \in D_z, \tau > 0,$$

$$T(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = T^0(x, y, z, \tau), \quad (2.4)$$

$$x \in D_x, y \in D_y, z \in D_z, \tau = 0,$$

$$\Gamma[T(x, y, z, \tau)] = Q(x, y, z, \tau), \quad (2.5)$$

$$x \in \partial \bar{D}_x, y \in \partial \bar{D}_y, z \in \partial \bar{D}_z, \tau > 0$$

где Γ – оператор, отражающий теплообмен на гранях Гр1-Гр6 пластины, включая тепловыделения УИТ и ИИС, теплопередачу в узлах крепления НК с НК КА, теплообмен излучением (2.1); $\bar{D}_x, \bar{D}_y, \bar{D}_z$ – области изменения переменных x, y, z , включая их границу $\partial \bar{D}_x, \partial \bar{D}_y, \partial \bar{D}_z$; Q – внешнее воздействие на НК. τ - время.

В условиях принятых допущений ММ ОУ, описывающая температурное поле в НК, принимает вид линейной краевой задачи с однородным трехмерным параболическим уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial T^2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial T^2(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] \quad (2.6)$$

$$\tau \in (0, \infty), x \in (0, R_1), y \in (0, R_2), z \in (0, R_3)$$

Здесь $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коэффициент температуропроводности; λ - коэффициент

теплопроводности; c - удельная теплоемкость; ρ - плотность.

Для замыкания задачи уравнение (2.6) дополняется краевыми условиями начальным:

$$T(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = T_0 = \text{const} \quad (2.7)$$

и граничными:

$$-\lambda \frac{T(x, y, z, \tau)}{x} \Big|_{x=0} = (y, z, \tau) \quad (2.8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = Q_{X_2}(y, z, \tau) \quad (2.9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = Q_{Y_1}(x, z, \tau) \quad (2.10)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=R_2} = Q_{Y_2}(x, z, \tau) \quad (2.11)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q_{Z_1}(x, y, \tau) \quad (2.12)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=R_3} = Q_{Z_2}(x, y, \tau) \quad (2.13)$$

В связи с особенностями исследования температурного поля НК с последующей параметрической идентификацией модели путем уточнения результатов в программной среде «ANSYS» на данном этапе нецелесообразно обобщать постановку задачи путем перехода к критериальной форме.

Краевую задачу, состоящую из однородного параболического уравнения (2.6) и неоднородных краевых условий (2.8) -(2.13) для удобства дальнейшего использования при синтезе САУ аппарата передаточных функций целесообразно представить в форме неоднородного уравнения [14, 71]

$$\frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - a \left[\frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] = \omega(x, y, z, \tau) \quad (2.14)$$

и однородных краевых условий

$$\frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \theta(x, y, z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (2.15)$$

$$\theta \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (2.16)$$

со стандартизирующей функцией:

$$\begin{aligned} \omega(x, y, z, \tau) = & Q_{X_1}(y, z, \tau) \delta(x) + Q_{X_2}(y, z, \tau) \delta(x - R_1) + Q_{Y_1}(x, z, \tau) \delta(y) + \\ & + Q_{Y_2}(x, z, \tau) + Q_{Z_1}(x, y, \tau) \delta(z) + Q_{Z_2}(x, y, \tau) \delta(z - R_3) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Здесь $\theta(x, y, z, \tau) = T(x, y, z, \tau) - T_0$, $Q_{X_1}(y, z, \tau)$, $Q_{X_2}(y, z, \tau)$, $Q_{Y_1}(x, z, \tau)$, $Q_{Y_2}(x, z, \tau)$,

$Q_{Z_1}(x, y, \tau)$, $Q_{Z_2}(x, y, \tau)$ - обобщенные тепловые потоки на соответствующие грани НК:

$$Q_{X_1}(y, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} \left[q_{X_1}(\tau) + q_{s_1}(\tau) V_{s_1}(y, z) + q_{p_1}(\tau) V_{p_1}(y, z) + q_{h_1}(\tau) V_{h_1}(y, z) \right] \quad (2.18)$$

$$Q_{X_2}(y, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} \left[(q_{X_2}(\tau) + q_{s_2}(\tau) V_{s_2}(y, z) + q_{p_2}(\tau) V_{p_2}(y, z) + q_{h_2}(\tau) V_{h_2}(y, z)) \right] \quad (2.19)$$

$$Q_{Y_1}(x, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} q_{Y_1}(\tau) \quad (2.20)$$

$$Q_{Y_2}(x, z, \tau) = \frac{1}{\lambda} \left[(q_{Y_2}(\tau) + \sum_{g=1}^3 q_{c_g}(\tau) V_{c_g}(x, z)) \right] \quad (2.21)$$

$$Q_{Z_1}(x, y, \tau) = \frac{1}{\lambda} \left[\left(q_{Z_1}(\tau) + q_{ld_1}(\tau) V_{ld_1}(x, y) + q_a(\tau) V_a(x, y) + \sum_{\varepsilon\varepsilon=1}^4 q_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(\tau) V_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(x, y) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^N q_{t_i}(\tau) V_{t_i}(x, y) + \sum_{k=1}^F q_{\alpha_k}(\tau) V_{\alpha_k}(x, y) + \sum_{\gamma=1}^E q_{r_\gamma}(\tau) V_{r_\gamma}(x, y) \right) \right] \quad (2.22)$$

$$Q_{Z_2}(x, y, \tau) = \frac{1}{\lambda} \left[\left(q_{Z_2}(\tau) + q_{ld_2}(\tau) V_{ld_2}(x, y) + q_b(\tau) V_b(x, y) + \sum_{\varepsilon\varepsilon=1}^4 q_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(\tau) V_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(x, y) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{i=1}^N q_{tu_i}(\tau) V_{tu_i}(x, y) + \sum_{k=1}^F q_{\alpha_k}(\tau) V_{\alpha_k}(x, y) + \sum_{\gamma=1}^E q_{ru_\gamma}(\tau) V_{ru_\gamma}(x, y) \right) \right] \quad (2.23)$$

$$q_{X_1}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_1}^4(\tau) - \theta_{gg_1}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_1} - \theta_{gg_1}) \quad (2.24)$$

$$q_{X_2}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_2}^4(\tau) - \theta_{gg_2}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_2} - \theta_{gg_2}) \quad (2.25)$$

$$q_{Y_1}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_3}^4(\tau) - \theta_{gg_3}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_3} - \theta_{gg_3}) \quad (2.26)$$

$$q_{Y_2}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_4}^4(\tau) - \theta_{gg_4}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_4} - \theta_{gg_4}) \quad (2.27)$$

$$q_{Z_1}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_5}^4(\tau) - \theta_{gg_5}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_5} - \theta_{gg_5}) \quad (2.28)$$

$$q_{Z_2}(\tau) = \sigma_{cm} \cdot \varepsilon^* \left(\theta_{sr_6}^4(\tau) - \theta_{gg_6}^4(\tau) \right) \approx \alpha(\theta_{sr_6} - \theta_{gg_6}) \quad (2.29)$$

Здесь $q_{X_1}(\tau), q_{X_2}(\tau)$ интенсивность внешнего теплообмена со средой внутри кожуха на грани $x=0$ и $x=R_1$ НК, $q_{Y_1}(\tau), q_{Y_2}(\tau)$ интенсивность внешнего теплообмена со средой внутри кожуха на грани $y=0$ и $y=R_2$ НК и $q_{Z_1}(\tau), q_{Z_2}(\tau)$ интенсивность внешнего теплообмена со средой внутри кожуха на грани $z=0$ и $z=R_3$ НК соответственно. σ_{cm} - постоянная Стефана-Больцмана. ε^* - степень черноты тела. $T_{sr_1}(\tau), T_{sr_2}(\tau), T_{sr_3}(\tau), T_{sr_4}(\tau), T_{sr_5}(\tau), T_{sr_6}(\tau)$ - температуры на внутренних поверхностях внешних ограждений НК ($\theta_{sr_1}(\tau), \theta_{sr_2}(\tau), \theta_{sr_3}(\tau), \theta_{sr_4}(\tau), \theta_{sr_5}(\tau), \theta_{sr_6}(\tau)$ в приращениях соответственно). $T_{gg_1}(0, y, z, \tau)$

$T_{gg_2}(R_1, y, z, \tau)$, $T_{gg_3}(x, 0, z, \tau)$, $T_{gg_4}(x, R_2, z, \tau)$, $T_{gg_5}(x, y, 0, \tau)$, $T_{gg_6}(x, y, R_3, \tau)$ - температуры граней НК ($\theta_{gg_1}(0, y, z, \tau)$, $\theta_{gg_2}(R_1, y, z, \tau)$, $\theta_{gg_3}(x, 0, z, \tau)$, $\theta_{gg_4}(x, R_2, z, \tau)$, $\theta_{gg_5}(x, y, 0, \tau)$, $\theta_{gg_6}(x, y, R_3, \tau)$ в приращениях соответственно) (см. рисунки 2.5-2.10).

$\alpha = 0.7488$ Вт/(м²·К) - эквивалентный коэффициент теплоотдачи при аппроксимации закона Стефана-Больцмана.

$q_{s_1}(\tau)$, $q_{s_2}(\tau)$ - тепловые потоки от приборов РС1, РС2 на грани $x = 0, x = R_1$ соответственно;

$q_{h_1}(\tau)$, $q_{h_2}(\tau)$ - тепловые потоки от точек крепления НК к КА на грани $x = 0, x = R_1$ соответственно;

$q_{p_1}(\tau)$, $q_{p_2}(\tau)$ - тепловые потоки от Рр1, Рр2 на грани $x = 0, x = R_1$ соответственно;

$q_{c_g}(\tau)$ - тепловые потоки от точек крепления НК к КА на грани $y = R_2, g = \overline{1, 3}$;

$q_{ld_1}(\tau)$, $q_{ld_2}(\tau)$ - тепловые потоки от Рld1, Рld2 на грани $z = 0, z = R_3$ соответственно;

$q_b(\tau)$, $q_a(\tau)$ - тепловые потоки от Ра, Рб на грани $z = 0, z = R_3$ соответственно;

$q_{t_i}(\tau)$, $q_{tu_i}(\tau)$ - тепловые потоки от *i*-ых, *ui*-ых элементов УИТ q_{t_i} и q_{tu_i} , расположенных на соответствующих гранях $z = 0$ и $z = R_3$, $i = \overline{1, N}$, где $N = 32$ - число УИТ на соответствующей грани НК (см. рисунки 2.4, 2.7, 2.10);

$q_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(\tau)$, $q_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}}(\tau)$ - тепловые потоки от Рr_{εε}, Рru_{εε} $\varepsilon\varepsilon = \overline{1, 4}$, на грани $z = 0, z = R_3$ НК (см. рисунки 2.8, 2.10);

$q_{\alpha_k}(\tau)$, $q_{\alpha u_k}(\tau)$ - тепловые потоки, распределенные равномерно по F точкам проекции оболочки α_k , αu_k на соответствующие грани $z = 0$ и $z = R_3$, $k = \overline{1, F}$, $F = 20$ - число точек проекции оболочки кожуха на соответствующей грани НК (см. рисунки 2.7, 2.9);

$q_{r_\gamma}(\tau)$, $q_{ru_\gamma}(\tau)$ - тепловые потоки, действующие в точках крепления оболочки к НК r_γ , ru_γ на соответствующие грани $z = 0$ и $z = R_3$, $\gamma = \overline{1, E}$, $E = 10$ - число точек крепления оболочки к НК;

$V_{s_1}(y, z)$, $V_{s_2}(y, z)$ - области воздействия тепловых потоков от приборов РС1, РС2 на гранях $x = 0, x = R_1$ соответственно;

$V_{h_1}(y, z), V_{h_2}(y, z)$ - области воздействия тепловых потоков от точек крепления НК к КА на гранях $x = 0, x = R_1$ соответственно;

$V_{p_1}(y, z), V_{p_2}(y, z)$ - области воздействия тепловых потоков от Pr_1, Pr_2 на гранях $x = 0, x = R_1$ соответственно;

$V_{c_g}(x, z)$ - области воздействия тепловых потоков от точек крепления НК к КА на грань $y = R_2, g = \overline{1, 3}$;

$V_{ld_1}(x, y), V_{ld_2}(x, y)$ - области воздействия тепловых потоков от Pld_1, Pld_2 на гранях $z = 0, z = R_3$ соответственно;

$V_b(x, y), V_a(x, y)$ - области воздействия тепловых потоков от Pa, Pb на гранях $z = 0, z = R_3$ соответственно;

$V_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(x, y), V_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}}(x, y)$ - области воздействия тепловых потоков от $Pr_{\varepsilon\varepsilon}, Pr_{u\varepsilon\varepsilon}$ $\varepsilon\varepsilon = \overline{1, 4}$, на гранях $z = 0, x = R_3$ НК;

$V_{t_i}(x, y), V_{tu_i}(x, y)$ - области воздействия тепловых потоков от i -ых, tu_i -ых элементов УИТ t_i и tu_i , расположенных на соответствующих гранях $z = 0$ и $z = R_3, i = \overline{1, N}$, где $N = 32$ - число УИТ на соответствующей грани НК (см. рисунки 2.4, 2.7, 2.10);

$V_{\alpha_k}(x, y), V_{\alpha u_k}(x, y)$ - области воздействия тепловых потоков, распределенных равномерно по F точкам проекции кожухов оболочки $\alpha_k, \alpha u_k$ на соответствующие грани $z = 0$ и $z = R_3, k = \overline{1, F}, F = 20$ - число точек проекции оболочки на соответствующей грани НК (см. рисунки 2.8, 2.10);

$V_{r_\gamma}(x, y), V_{ru_\gamma}(x, y)$ - области воздействия тепловых потоков, действующих в точках крепления оболочки к НК r_γ, ru_γ на соответствующих гранях $z = 0$ и $z = R_3, \gamma = \overline{1, E}, E = 10$ - число точек крепления оболочки к НК (см. рисунки 2.8, 2.9).

$$V_{s_1}(y, z) = \delta(y - y_{s_1}) \cdot \delta(z - z_{s_1}) \quad (2.30)$$

$$V_{s_2}(y, z) = \delta(y - y_{s_2}) \cdot \delta(z - z_{s_2}) \quad (2.31)$$

$$V_{h_1}(y, z) = \delta(y - y_{h_1}) \cdot \delta(z - z_{h_1}) \quad (2.32)$$

$$V_{h_2}(y, z) = \delta(y - y_{h_2}) \cdot \delta(z - z_{h_2}) \quad (2.33)$$

$$V_{p_1}(y, z) = \delta(y - y_{p_1}) \cdot \delta(z - z_{p_1}) \quad (2.34)$$

$$V_{p_2}(y, z) = \delta(y - y_{p_2}) \cdot \delta(z - z_{p_2}) \quad (2.35)$$

$$V_{c_g}(x, z) = \delta(x - x_{c_g}) \cdot \delta(z - z_{c_g}), \quad g = \overline{1, 3} \quad (2.36)$$

$$V_{ld_1}(x, y) = \delta(x - x_{ld_1}) \cdot \delta(y - y_{ld_1}) \quad (2.37)$$

$$V_{ld_2}(x, y) = \delta(x - x_{ld_2}) \cdot \delta(y - y_{ld_2}) \quad (2.38)$$

$$V_b(x, y) = \delta(x - x_b) \cdot \delta(y - y_b) \quad (2.39)$$

$$V_a(x, y) = \delta(x - x_a) \cdot \delta(y - y_a) \quad (2.40)$$

$$V_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}(x, y) = \delta(x - x_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}) \cdot \delta(y - y_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}), \quad \varepsilon\varepsilon = \overline{1, 4} \quad (2.41)$$

$$V_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}}(x, y) = \delta(x - x_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}}) \cdot \delta(y - y_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}}), \quad \varepsilon\varepsilon = \overline{1, 4} \quad (2.42)$$

$$V_{t_i}(x, y) = \delta(x - x_{t_i}) \cdot \delta(y - y_{t_i}), \quad i = \overline{1, N} \quad (2.43)$$

$$V_{tu_i}(x, y) = \delta(x - x_{tu_i}) \cdot \delta(y - y_{tu_i}), \quad i = \overline{1, N} \quad (2.44)$$

$$V_{\alpha_k}(x, y) = \delta(x - x_{\alpha_k}) \cdot \delta(y - y_{\alpha_k}), \quad k = \overline{1, F} \quad (2.45)$$

$$V_{au_k}(x, y) = \delta(x - x_{au_k}) \cdot \delta(y - y_{au_k}), \quad k = \overline{1, F} \quad (2.46)$$

$$V_{r_\gamma}(x, y) = \delta(x - x_{r_\gamma}) \cdot \delta(y - y_{r_\gamma}), \quad \gamma = \overline{1, E} \quad (2.47)$$

$$V_{ru_\gamma}(x, y) = \delta(x - x_{ru_\gamma}) \cdot \delta(y - y_{ru_\gamma}), \quad \gamma = \overline{1, E} \quad (2.48)$$

где $(y_{s_1}, z_{s_1}), (y_{s_2}, z_{s_2})$ - координаты расположения приборов РС1, РС2 на гранях $x = 0, x = R_1$ соответственно; $(y_{h_1}, z_{h_1}), (y_{h_2}, z_{h_2})$ - координаты точек крепления НК к КА на гранях $x = 0, x = R_1$ соответственно; $(y_{p_1}, z_{p_1}), (y_{p_2}, z_{p_2})$ - координаты расположения Рр1, Рр2 на гранях $x = 0, x = R_1$ соответственно; (x_{c_g}, z_{c_g}) - координаты 3-х точек крепления НК к КА на грань $y = R_2, g = \overline{1, 3}; (x_{ld_1}, y_{ld_1}), (x_{ld_2}, y_{ld_2})$ - координаты расположения Рld1, Рld2 на гранях $z = 0, z = R_3$ соответственно; $(x_b, y_b), (x_a, y_a)$ - координаты расположения Ра, Рб на гранях $z = 0, z = R_3$ соответственно; $(x_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}, y_{Pr_{\varepsilon\varepsilon}}), (x_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}}, y_{Pr_{u\varepsilon\varepsilon}})$ - координаты расположения Рr_{εε}, Рru_{εε}, εε = $\overline{1, 4}$ на гранях $z = 0, z = R_3$ НК; $(x_{t_i}, y_{t_i}), (x_{tu_i}, y_{tu_i})$ - координаты i -ых, tu_i -ых элементов СТГС t_i и tu_i , расположенных на соответствующих гранях $z = 0$ и $z = R_3$, $i = \overline{1, N}$, где $N = 32$ - число УИТ на соответствующей грани НК при их точечной

аппроксимации (см. рисунки 2.5, 2.7, 2.10); $(x_{\alpha_k}, y_{\alpha_k}), (x_{\alpha u_k}, y_{\alpha u_k})$ - координаты точек α_k , αu_k проекции оболочки на соответствующие грани $z = 0$ и $z = R_3$, $k = \overline{1, F}$, $F = 20$ - число точек проекции оболочки на соответствующей грани НК (см. рисунки 2.8, 2.10); $(x_{r_\gamma}, y_{r_\gamma}), (x_{ru_\gamma}, y_{ru_\gamma})$ - координаты точек r_γ , ru_γ крепления оболочки к НК на соответствующих гранях $z = 0$ и $z = R_3$, $\gamma = \overline{1, E}$, $E = 10$ - число точек крепления оболочки к НК. Для приближенного синтеза САУ температура среды принимается одинаковой внутри кожуха и равной $T_{sr_1} = 292K$;

Интенсивность тепловых потоков УИТ $q_{t_i}(\tau)$ и $q_{tu_i}(\tau)$ является управляющим дискретно-распределенным воздействием. Остальные тепловые потоки представляют собой возмущающие воздействия.

Сформулированную краевую задачу (2.14) – (2.29) будем определять как ММ ОУ.

В этом виде ММ ОУ представляет собой неявную форму описания объекта управления (ОУ). Для получения явной зависимости $\theta(x, y, z, \tau, q_{ti}, q_{tui})$ от своих аргументов необходимо решить краевую задачу (2.14) - (2.29). Явную форму ММ ОУ представим как решение линейной краевой задачи (2.14) – (2.29) в соответствии с принципом суперпозиции в виде суммы решений частных вспомогательных задач [32, 38, 64, 83].

В силу того, что для рассматриваемой ММ ОУ управляющие воздействия и возмущения представляют собой потоки тепла на гранях НК т.е. формируют граничные условия 2-го рода, температурное поле рассматриваемой краевой задачи представляется суммой температурных полей соответствующих одномерных пластин.

$$\theta(x, y, z, \tau) = \theta_x^{(2)}(x, \tau) + \theta_y^{(2)}(y, \tau) + \theta_z^{(2)}(z, \tau) + \theta^{(3)}(x, y, z, \tau) \quad (2.49)$$

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

$$\frac{\partial \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad x \in (0, R_1) \quad (2.50)$$

$$\theta_x^{(2)}(x, \tau)|_{\tau=0} = 0, \quad x \in [0, R_1] \quad (2.51)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = Q_{x1}(\tau)|_{x=0, q_{x1}=0}, \quad \tau \geq 0 \quad (2.52)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = Q_{x2}(\tau) |_{x=R_2, q_{x2}=0}, \tau \geq 0 \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial \theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial y^2} = 0, \tau > 0, y \in (0, R_2) \quad (2.54)$$

$$\theta_y^{(2)}(x, \tau) |_{\tau=0} = 0, y \in [0, R_2] \quad (2.55)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = Q_{y1}(\tau) |_{y=0, q_{y1}=0}, \tau \geq 0 \quad (2.56)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=R_2} = Q_{y2}(\tau) |_{y=R_2, q_{y2}=0}, \tau \geq 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial \theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial z^2} = 0, \tau > 0, z \in (0, R_3) \quad (2.58)$$

$$\theta_z^{(2)}(z, \tau) |_{\tau=0} = 0, z \in [0, R_3] \quad (2.59)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q_{z1}(\tau) |_{z=0, q_{z1}=0}, \tau \geq 0 \quad (2.60)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=R_2} = Q_{z2}(\tau) |_{z=R_3, q_{z2}=0}, \tau \geq 0 \quad (2.61)$$

Решение одномерных задач (2.50) - (2.61) известно [40], а решение $\theta^{(3)}(x, y, z, \tau)$ в (2.49) с граничными условиями 3-го рода может быть выражено через произведение соответствующих одномерных задач

$$\theta^{(3)}(x, y, z, \tau) = \theta_x^{(3)}(x, \tau) \cdot \theta_y^{(3)}(y, \tau) \cdot \theta_z^{(3)}(z, \tau) \quad (2.62)$$

где множители являются решениями соответствующих краевых задач для одномерных бесконечных пластин с граничными условиями 3-го рода.

$$\frac{\partial \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial x^2} = 0, \tau > 0, x \in (0, R_1) \quad (2.63)$$

$$\theta_x^{(3)}(x, \tau) |_{\tau=0} = 0, x \in [0, R_1] \quad (2.64)$$

$$\frac{\partial \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(\theta_{sr1} - \theta_x^{(3)}(x, \tau) |_{x=0}), \tau \geq 0 \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial \theta_x^{(3)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = \alpha(\theta_{sr2} - \theta_x^{(3)}(x, \tau) |_{x=R_1}), \tau \geq 0 \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial \theta_y^{(3)}(y, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_y^{(3)}(y, \tau)}{\partial y^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad y \in (0, R_2) \quad (2.67)$$

$$\theta_y^{(3)}(x, \tau)|_{\tau=0} = 0, \quad y \in [0, R_2] \quad (2.68)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_y^{(3)}(y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = \alpha(\theta_{sr3} - \theta_y^{(3)}(y, \tau)|_{y=0}), \quad \tau \geq 0 \quad (2.69)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_y^{(3)}(y, \tau)}{\partial y} \right|_{y=R_2} = \alpha(\theta_{sr4} - \theta_y^{(3)}(y, \tau)|_{y=R_2}), \quad \tau \geq 0 \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial \theta_z^{(3)}(z, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \theta_z^{(3)}(z, \tau)}{\partial z^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad z \in (0, R_3) \quad (2.71)$$

$$\theta_z^{(3)}(z, \tau)|_{\tau=0} = 0, \quad z \in [0, R_3] \quad (2.72)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_z^{(3)}(z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha(\theta_{sr5} - \theta_z^{(3)}(z, \tau)|_{z=0}), \quad \tau \geq 0 \quad (2.73)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_z^{(3)}(z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=R_3} = \alpha(\theta_{sr6} - \theta_z^{(3)}(z, \tau)|_{z=R_3}), \quad \tau \geq 0 \quad (2.74)$$

Слагаемое $\theta^{(3)}(x, y, z, \tau)$ (2.49) может быть также выражено через решение соответствующих задач с граничными условиями 2-го рода с помощью соответствующей комбинации передаточных функций [75] (см. рис. 3.2).

2.3 Выводы по второй главе

1. Обоснована постановка задачи математического моделирования температурного распределения в теплонагруженной нестационарными тепловыми потоками НК от размещенных на НК приборов ИИС и внешних тепловых потоков.

2. Сформулирована неявная трехмерная математическая модель ММ ОУ нестационарного температурного поля в НК ИИС КА в форме линейной краевой задачи в условиях обоснованных допущений.

3. Предложена форма явной трехмерной математической модели температурного поля в теплонагруженной НК ИИС КА в виде комбинации одномерных краевых задач теплопроводности.

4. Предложена модификация ММ ОУ неоднородного уравнения теплопроводности с одинарными краевыми условиями, для получения передаточных функций с применением стандартизирующей функции.

3 СТРУКТУРА ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ В ФОРМЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Необходимо в условиях ограничений $U(\tau) \in \overline{U}_{don} \subset L_2$ создать алгоритм автоматического управления

$$U(\tau) = (q_{t_1}(\tau), q_{t_2}(\tau), \dots, q_{t_N}(\tau), q_{tu_1}(\tau), q_{tu_2}(\tau), \dots, q_{tu_N}(\tau))^T \in \overline{U}_{don} \quad (3.1)$$

ОУ с распределенными параметрами (ОРП) (2.14) – (2.29) обеспечивающий максимально допустимый термоперепад $\max_{x,y,z} \left| \theta_{\max}(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=\tau_k} - \theta_{\min}(x, y, z, \tau) \Big|_{\tau=\tau_k} \right| \leq \varepsilon_{зад_1}$ 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. Здесь $\varepsilon_{зад_1} = 4K$ - допустимая равномерная погрешность поддержания температурного поля НК, $\overline{U}_{don} \in L_2$ - замкнутая ограниченная область допустимого управления (плотности мощности $q_{ti}(\tau), q_{tui}(\tau)$ УИТ, $i = \overline{1, N}$), принадлежащая пространству L_2 : измеримых функций.

Так как в заданных условиях функционирования КА компонентами вектора управляющего воздействия $U(\tau)$ является интенсивность $q_{t_i}(\tau), q_{tu_i}(\tau)$ $i = \overline{1, N}$ тепловых потоков УИТ (плотности мощности УИТ) $q_{t_i}(\tau) = \frac{P_{t_i}(\tau)}{S_{t_i}(\tau)}$, $q_{tu_i}(\tau) = \frac{P_{tu_i}(\tau)}{S_{tu_i}(\tau)}$, представляющая собой мощность УИТ $P_{t_i}(\tau)$, $P_{tu_i}(\tau)$ на единицу площади $S_{t_i}(\tau)$, $S_{tu_i}(\tau)$ теплорассеивающей подложки УИТ мощности $P_{t_i}(\tau)$, $P_{tu_i}(\tau)$ каждого УИТ, ограничение $U(\tau) \in \overline{U}_{don} \subset L_2$ на управляющее воздействие $U(\tau)$ примет для компонент $q_{t_i}(\tau)$, $q_{tu_i}(\tau)$, $i = \overline{1, N}$, вектора вид:

$$0 \leq q_{t_i}(\tau) \leq \frac{P_{\max_i}}{S_{t_i}} \quad (3.2)$$

$$0 \leq q_{tu_i}(\tau) \leq \frac{P_{\max_i}}{S_{tu_i}}, \quad i = 1..N \quad (3.3)$$

где $P_{\max_i} = 30 \text{Вт}$ - допустимая максимальная мощность УИТ, ограниченная конструктивно, эксплуатационно и энергетически; $S_{t_i} = S_{tu_i}$ - площадь теплорассеивающей подложки i -го УИТ [м^2]

Кроме заданной допустимой статической неравномерности температурного поля НК $\varepsilon_{\text{зад}} \leq 4^\circ\text{К}$ устанавливаются динамические показатели качества управления температурным полем НК; перерегулирование $\sigma_p \leq 30^\circ\text{С}$; степень затухания $\psi \geq 97\%$;

Сформулированная ММ ОУ (2.14) – (2.29) с точки зрения теории управления, представляет собой объект управления с распределенными параметрами (ОРП). Для решения поставленной задачи синтеза алгоритма автоматического управления температурными режимами НК удобно использовать описание процесса распространения температурного поля в НК ИИС как объекта управления в форме структурной схемы, содержащей передаточные функции. Передаточные функции для ОРП отличаются от аналогичных передаточных функций для объектов с сосредоточенными параметрами своей зависимостью от пространственных координат

3.1 Функционально ориентированная математическая модель объекта управления в форме передаточных функций

В силу того, что управляющее воздействие (3.1) представляет собой вектор тепловых потоков $q_{t_i}(\tau)$ и $q_{tu_i}(\tau)$ УИТ свертка функции Грина с граничными условиями второго рода (2.8) – (2.13) 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 (2.49). Компонента $\theta^{(3)}(x, y, z, \tau)$ в (2.49) определяется сверткой функции Грина с граничными условиями 3го рода (2.65), (2.66), (2.69), (2.70), (2.73), (2.74) в условиях линеаризации граничных условий Стефана-Больцмана (2.24) - (2.29) путем их аппроксимации условиями теплообмена по закону Ньютона (граничными условиями 3го рода) [27].

Тогда в качестве передаточной функции $W^{(2)}(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p)$ ОРП используется изображение по Лапласу функции Грина:

$$\begin{aligned} W^{(2)}(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p) &= \tilde{G}(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p) = \\ &= \int_0^\infty G(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, \tau - t^*) \cdot e^{-p\tau} d\tau \end{aligned} \quad (3.4)$$

где ξ_x, ξ_y, ξ_z - координаты теплоисточников [43].

Типовой распределённый блок в пространстве трансформант Лапласа можно представить в виде звена, на вход которого подаётся стандартизирующая функция $w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau)$ (2.17). Она определяется в соответствии с начальным состоянием объекта (2.7), управляющими воздействиями $q_{t_i}(\tau)$, $q_{tu_i}(\tau)$, $i = \overline{1, N}$, входящими в граничные условия (2.8) – (2.13) и возмущениями (2.28)-(2.29). На выходе объекта путем свертки (3.4) формируется результирующее распределение $\theta(x, y, z, \tau)$.

Передаточную функцию для каждой из компонент $\theta_x^{(2)}(x, \tau)$, $\theta_y^{(2)}(y, \tau)$, $\theta_z^{(2)}(z, \tau)$ в (2.49) можно получить, используя преобразование Лапласа функций Грина для вспомогательных краевых задач (2.50)-(2.61), предполагая управляющими и возмущающими воздействиями потоки Q_{x_1} , Q_{x_2} , Q_{y_1} , Q_{y_2} , Q_{z_1} , Q_{z_2} (2.18)-(2.23) на гранях НК.

Функции Грина, для каждой одномерной краевой задачи (2.50) – (2.61) имеют вид:

$$G_n(x, \xi_x, \tau - t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n^{(\tau)}(\mu_n, \tau - t) \varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi_x) \quad (3.5)$$

$$G_m(y, \xi_y, \tau - t) = \sum_{m=0}^{\infty} G_m^{(\tau)}(\psi_m, \tau - t) \varphi_m(\psi_m, y) \varphi_m(\psi_m, \xi_y) \quad (3.6)$$

$$G_\chi(z, \xi_z, \tau - t) = \sum_{\chi=0}^{\infty} G_\chi^{(\tau)}(\gamma_\chi, \tau - t) \varphi_\chi(\gamma_\chi, z) \varphi_\chi(\gamma_\chi, \xi_z) \quad (3.7)$$

$G_n^{(\tau)}(\mu_n, \tau - t) = \exp(-\mu_n^2 \tau)$, $G_m^{(\tau)}(\psi_m, \tau - t) = \exp(-\psi_m^2 \tau)$, $G_\chi^{(\tau)}(\gamma_\chi, \tau - t) = \exp(-\gamma_\chi^2 \tau)$ - временные

компоненты функции Грина; $\varphi_n(\mu_n, x) = \cos(\pi n \frac{x}{R_1}) \frac{1}{E_n}$, $\varphi_m(\psi_m, x) = \cos(\pi m \frac{y}{R_2}) \frac{1}{E_m}$,

$\varphi_\chi(\gamma_\chi, x) = \cos(\pi \chi \frac{z}{R_3}) \frac{1}{E_\chi}$ - собственные функции, а μ_n , ψ_m , γ_χ - собственные числа,

полученные классическим решением соответствующей задачи Штурма-Лиувилля для граничных условий 2-го рода; E_n , E_m , E_χ - нормирующие множители [40, 75].

Функция Грина $G(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, \tau - t^*)$ здесь имеет физический смысл реакции ОРП (2.12) - (2.14) на возмущение в форме δ - функции Дирака в правой части (2.14), в точке с координатами (ξ_x, ξ_y, ξ_z) в момент времени $\tau = t^*$.

Распределение $\theta(x, y, z, \tau)$ как решение краевой задачи (2.14) -(2.29) под воздействием стандартизирующей функции (2.17) выражается через функцию Грина [14,43,71].

$$\begin{aligned} \theta(x, y, z, \tau) = & \int_0^\tau \int_0^{R_1} w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau) \cdot G_n(x, \xi_x, \tau - t) dx dt + \\ & + \int_0^\tau \int_0^{R_2} w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau) \cdot G_m(y, \xi_y, \tau - t) dy dt + \\ & + \int_0^\tau \int_0^{R_3} w(\xi_x, \xi_y, \xi_z, \tau) \cdot G_\chi(z, \xi_z, \tau - t) dz dt \end{aligned} \quad (3.8)$$

Для ММ (2.14) -(2.16) трансформанта Лапласа функции Грина с учетом (2.51-2.52) примет следующий вид [14, 99]:

$$\begin{aligned} G_x(x, p) = & a\lambda^{-1}(W_x^{(2)}(x, \xi_x, p)) = (c \cdot \rho \cdot R_1)^{-1} \cdot \\ & \cdot \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{x}{R_1}) \cdot R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} \left[R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\} \\ G_y(y, p) = & a\lambda^{-1}(W_y^{(2)}(y, \xi_y, p)) = (c \cdot \rho \cdot R_2)^{-1} \cdot \\ & \cdot \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{y}{R_2}) \cdot R_2^2 (a\pi^2 m^2)^{-1} \left[R_2^2 (a\pi^2 m^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\} \\ G_z(z, p) = & a\lambda^{-1}(W_z^{(2)}(z, \xi_z, p)) = (c \cdot \rho \cdot R_3)^{-1} \cdot \\ & \cdot \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{\chi=1}^{\infty} (-1)^\chi \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{z}{R_3}) \cdot R_3^2 (a\pi^2 \chi^2)^{-1} \left[R_3^2 (a\pi^2 \chi^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Структура каждой из передаточных функций $W_x^{(2)}(x, \xi_x, p); W_y^{(2)}(y, \xi_y, p); W_z^{(2)}(z, \xi_z, p);$ в (3.9) имеет вид суммы интегрирующего звена с бесконечным числом аperiodических 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 $\mu_n, \psi_m, \gamma_\chi$ задач (2.50)-(2.61).

Например, для краевой задачи (2.50) -(2.53)

$$W_x^{(2)}(x, \xi_x, p) = \frac{1}{c \cdot \rho \cdot R_1} \left[\frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos(\pi n \frac{x}{R_1}) \cos(\pi n \frac{\xi_x}{R_1}) \frac{R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1}}{R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} p + 1} \right] \quad (3.10)$$

Для задач (2.54) -(2.57) вид передаточной функции аналогичен (3.10).

На рисунке 3.1 приведено структурное представление ОРП (2.14) -(2.29) для произвольной точки $M(x, y, z)$ НК в виде параллельного соединения интегрирующего звена и бесконечного числа аperiodических звеньев по каждой из координат (x, y, z) [75] с параметрами:

$$\begin{aligned}
 K_n^x &= 2 \frac{(\cos(\pi n \frac{x}{R_1}) \cos(\pi n \frac{\xi_x}{R_1})) R_1^2}{a \pi^2 n^2}, \quad n = \overline{1, \infty} \\
 K_m^y &= 2 \frac{(\cos(\pi m \frac{y}{R_2}) \cos(\pi m \frac{\xi_y}{R_2})) R_2^2}{a \pi^2 m^2}, \quad m = \overline{1, \infty} \\
 K_\chi^z &= 2 \frac{(\cos(\pi \chi \frac{z}{R_3}) \cos(\pi \chi \frac{\xi_z}{R_3})) R_3^2}{a \pi^2 \chi^2}, \quad \chi = \overline{1, \infty} \\
 T_{xn} &= R_1^2 / a \pi n^2; \quad T_{ym} = R_2^2 / a \pi m^2; \quad T_{z\chi} = R_3^2 / a \pi \chi^2; \quad a = \frac{\lambda}{c \rho}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

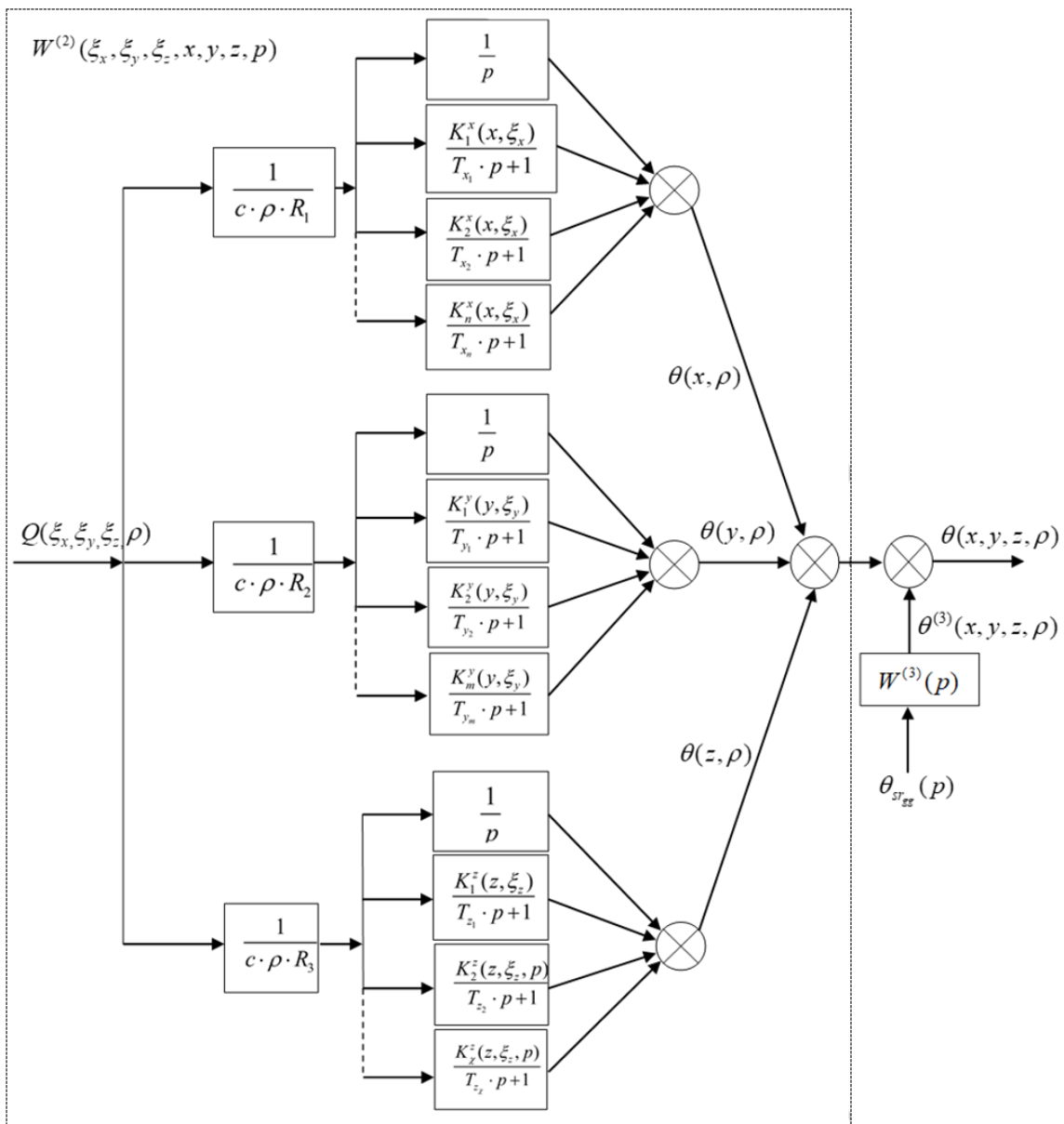


Рисунок 3.1– Упрощенная расчетная структура $W_{oy}^{(2)}(M, p)$ объекта управления

Таким образом передаточная функция $W_{oy}^{(2)}(x, y, z, \xi_x, \xi_y, \xi_z, \rho) = W_x^{(2)}(x, \xi_x, \rho) + W_y^{(2)}(x, \xi_y, \rho) + W_z^{(2)}(x, \xi_z, \rho)$ в соответствии с выражениями (3.8), (3.9) определяет зависимость температурного поля рассматриваемого ОРП (2.6) – (2.13) при граничных условиях второго рода от распределения и мощности тепловыделения приборов ИИС, теплообмена с окружающей средой, а также от воздействия УИТ на соответствующие грани НК.

Передаточная функция $W^{(3)}(\rho)$ определяет влияние окружающей НК среды. Эта передаточная функция в предлагаемой расчетной методике синтеза САУ регулятора может определяться модификацией $W^{(2)}(\xi_x, \xi_y, \xi_z, x, y, z, \rho)$ путем её структурного преобразования [71], что допустимо, естественно, в случае линеаризации теплообмена излучением (2.1) граничными условиями 3 рода (2.2) и в заданном температурном диапазоне отклонений от стационарного базового температурного режима НК.

На рисунке (3.2) приведена упрощенная расчетная схема учета граничных условий 3 рода путем преобразования расчетной структурной схемы для граничных условий 2 рода.

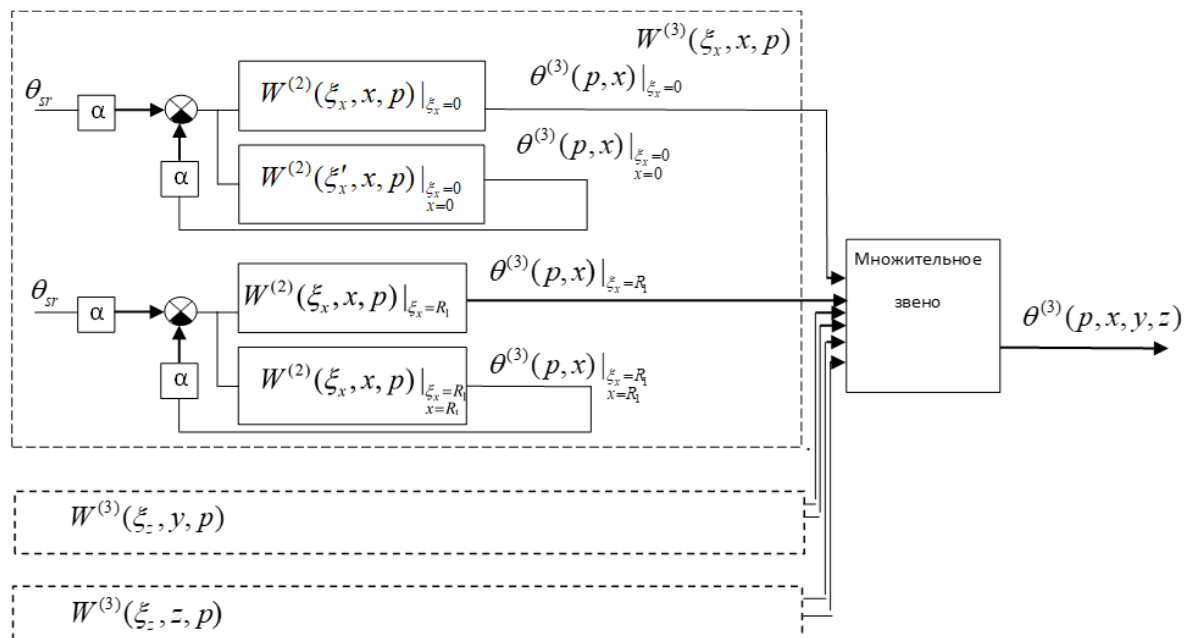


Рисунок 3.2 – Обобщенная структурная расчетная схема учета граничных условий 3 рода

Вопрос количества удерживаемых членов ряда в (3.9), (3.10) в этом случае трансформируется в проблему ограничения числа аperiodических звеньев в структурной

схеме на рисунке 3.2 и определяется целями и задачами расчета. Для этого необходимо провести параметрическую идентификацию усеченного ряда (3.9), (3.10) где в качестве параметров рассматриваются числа N, M, χ_i , коэффициенты $K^x(x, \xi_x), K^y(y, \xi_y), K^z(z, \xi_z)$ и постоянные времени $T_{x_n}, T_{y_m}, T_{z_\chi}, n=\overline{1, N}, m=\overline{1, M}, \chi=\overline{1, \chi_i}$, (см.(3.11)) Подобная идентификация в программной среде «Matlab» произведена в работе [40], где установлены путем сравнения с численным экспериментом на уточненной конечно-элементной модели в среде «ANSYS» модифицированные значения коэффициентов и постоянных времени, а также установлено допустимое по точности количество аperiodических звеньев в структуре на рис. 3.2 $N=M=\chi_i=3$, схема идентификации для $W_x^{(2)}(x, \xi_x, p)$ приведена на рис 3.3.

Критерий идентификации $I = \int_0^\tau \left| \theta_x^{(2N)}(x, \tau) - \theta_H^{Ansys}(x, \tau) \right| d\tau$, отражающий величину

отклонения идентифицируемой переходной характеристики $\theta_x^{(2)}(x, \tau) = \theta_x^{(2N)}(x, \tau)$, от данных вычислительного эксперимента $\theta_H^{Ansys}(x, \tau)$, полученного на уточненной численной модели «ANSYS», минимизируется путем поисковой процедуры в среде «Matlab». Здесь $\theta_x^{(2N)}(x, \tau)$ -компонента $\theta_x^{(2)}(x, \tau)$ в (2.49) при ограничении на уровне N числа удерживаемых членов ряда в (3.10).

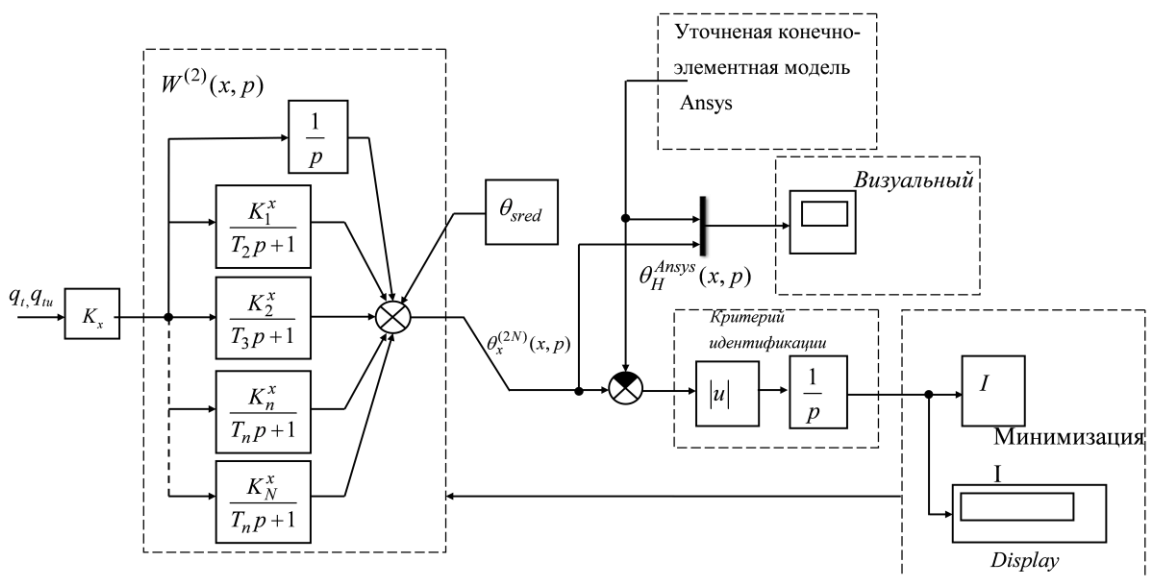


Рисунок 3.3 – Схема идентификации $W_{OY}^{(2)}(x, \xi_x, p)$ структуры объекта по каналу
 “теплоисточник-точка контроля”

Результаты идентификации приведены на рисунках 3.4, 3.5

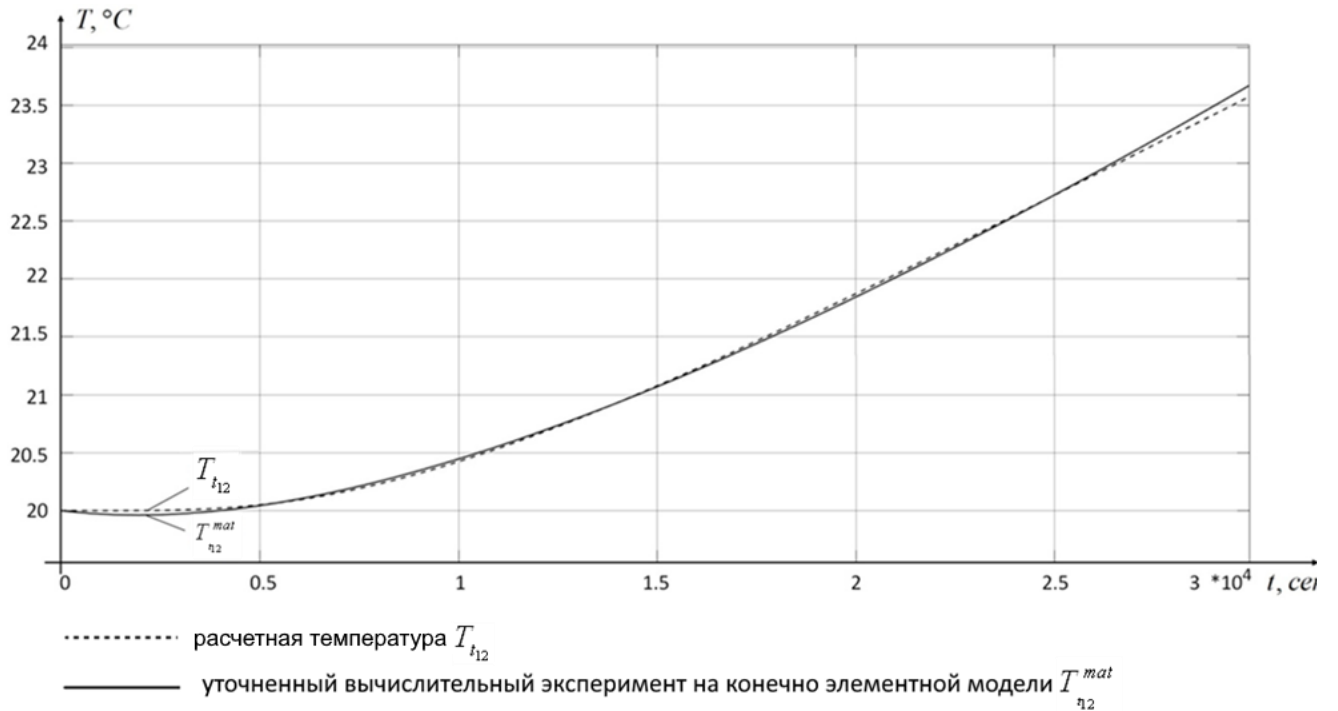


Рисунок 3.4 – Результаты идентификации. Температура в узле t_{12} при возмущающем воздействии потоком $q_{t_{12}}(\tau) = 1(\tau)$ тепловыделяющего прибора бортовой ИИС. N=3

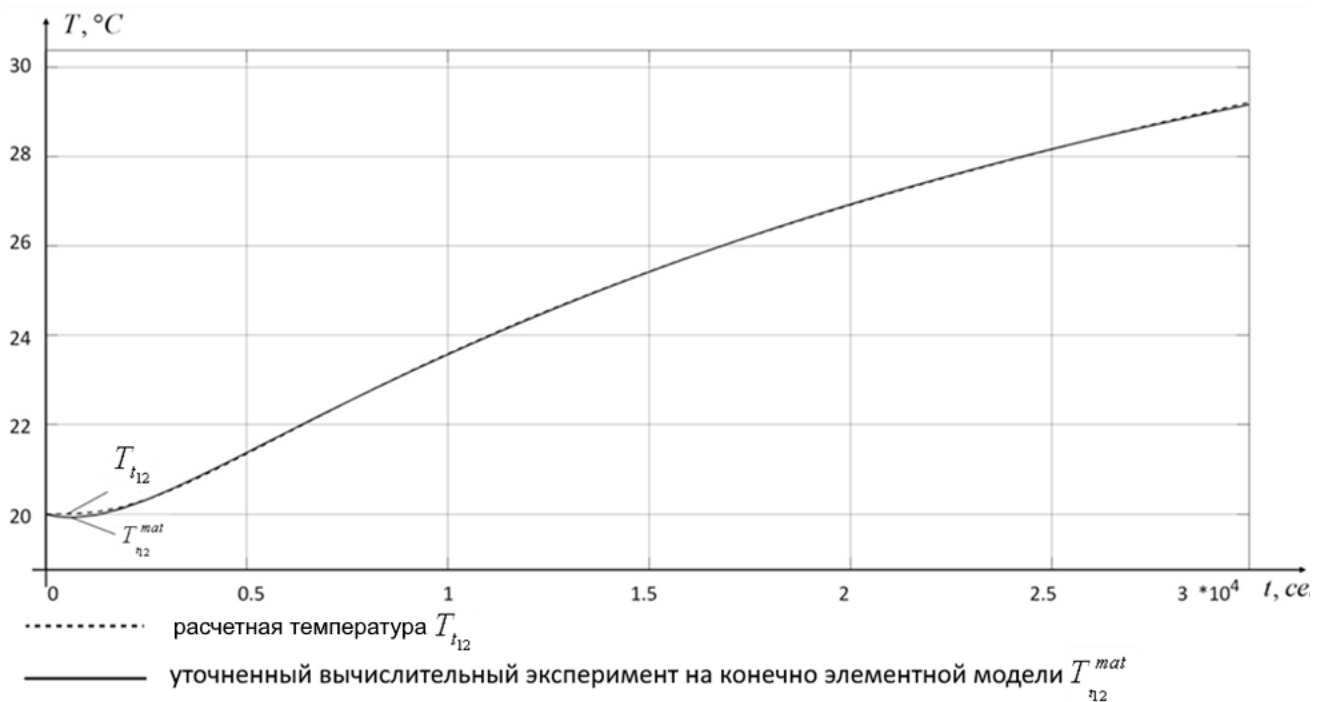


Рисунок 3.5 – Результаты идентификации. Температура в узле t_{12} при управляющем воздействии УИТ $q_{t_{12}}(\tau) = 1(\tau)$. $N=3$

3.2 Модификация передаточных функций ОУ

Передаточные функции $W_{OY}^{(2)}(\xi_x, \xi_y, \xi_z, x, y, z, p)$ в форме (3.10) (см. рисунок 3.1) и аналогичные ей моделируют каналы передачи тепла от точечного теплоисточника к точке контроля. В 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. Здесь и далее, применительно к каналам передачи тепла, термин «площадь» считается синонимом термину «область». В такой постановке возможны четыре варианта каналов передачи: Точка \rightarrow Точка, Точка \rightarrow Площадь, Площадь \rightarrow Точка и Площадь \rightarrow Площадь. При этом в дальнейшем температурное поле НК 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 -ми точками контроля температуры $M_i = (x_i, y_i, z_i)$, $i = \overline{1, N}$ (см. рис. 2.10). Коэффициенты этих передаточных функций по каналу «Точка \rightarrow Точка» определены формулами типа (3.11) и уточнены путем параметрической идентификации. Определим расчетные формулы для коэффициентов передаточных функций по

остальным трём типам каналов с учетом удерживаемого количества собственных функций и собственных чисел.

Коэффициенты передаточных функций по каналу «Точка → Площадь», исходя из вариантов расположения «Площади», должны учитывать пространственную распределенность соответствующих областей, например, для площади грани №1 (см. рисунок 2.5), и с учетом (3.11) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) dR_x \\
 K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) dR_y \\
 K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3})
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Здесь пространственная распределенность приемника «Площадь грани №1» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (x - от 0 до R_1 , y - от 0 до R_2 , $z = R_3$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ - координаты источника (Точки). Аналогичным образом определяются формулы для расчета коэффициентов передаточных функций по другим видам «Площадей».

$$\begin{aligned}
 K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) dR_x \\
 K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) dR_y \\
 K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3})
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

В формулах (3.13) пространственная распределенность приемника «Площадь грани №2» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты x - от 0 до R_1 , для координаты y - от 0 до R_2 , координата $z=0$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ - координаты источника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) dR_z
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Здесь пространственная распределенность приемника «Площадь грани №3» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты y - от 0 до R_2 , для координаты z - от 0 до R_3 , координата $x=0$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \cos(\pi \cdot n) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) dR_z
\end{aligned} \tag{3.15}$$

В формулах (3.15) пространственная распределенность приемника «Площадь грани №4» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты y - от 0 до R_2 , для координаты z - от 0 до R_3 , координата $x=R_1$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) dR_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) dR_z
\end{aligned} \tag{3.16}$$

В формулах (3.16) пространственная распределенность приемника «Площадь грани №5» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты x - от 0 до R_1 , для координаты z - от 0 до R_3 , координата $y=0$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) dR_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \cos(\pi \cdot m) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) dR_z
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Пространственная распределенность приемника «Площадь грани №6)» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты x - от 0 до R_1 , для координаты z - от 0 до R_3 , координата $y = R_2$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

Коэффициенты передаточных функций по каналу «Точка → Площадь», например, для площади посадочного места под прибор, расположенный на грани №1 в качестве приемника, рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_{R_{x_0}}^{R_{x_1}} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) dR_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_{R_{y_0}}^{R_{y_1}} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3})
\end{aligned} \tag{3.18}$$

В этих формулах пространственная распределенность приемника «Площадь прибора на грани №1» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам посадочного места прибора (для координаты x - от R_{x_0} до R_{x_1} , для координаты y - от R_{y_0} до R_{y_1} , координата $z = R_3$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

Коэффициенты передаточных функций по каналу «Площадь → Точка» определяются аналогично коэффициентам передаточных функций по каналу «Точка → Площадь». При этом изменяются показатели пространственной распределенности.

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_{R_{x_0}}^{R_{x_1}} \cos\left(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}\right) dR_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_{R_{y_0}}^{R_{y_1}} \cos\left(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}\right) dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos\left(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}\right)
\end{aligned} \tag{3.19}$$

В формулах (3.19) пространственная распределенность приемника «Площадь прибора на грани №2» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам посадочного места прибора (для координаты x - от R_{x_0} до R_{x_1} , для координаты y - от R_{y_0} до R_{y_1} , координата $z=R_3$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \cos\left(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}\right) \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_{R_{y_0}}^{R_{y_1}} \cos\left(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}\right) dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_{R_{z_0}}^{R_{z_1}} \cos\left(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}\right) dR_z
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Пространственная распределенность приемника «Площадь прибора на грани №3» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам посадочного места прибора (для координаты y - от R_{y_0} до R_{y_1} , для координаты z - от R_{z_0} до R_{z_1} , координата $x=0$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \cos(\pi \cdot n) \cdot \cos\left(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}\right) \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_{R_{y_0}}^{R_{y_1}} \cos\left(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}\right) dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_{R_{z_0}}^{R_{z_1}} \cos\left(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_z}{R_3}\right) \cdot \cos\left(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}\right) dR_z
\end{aligned} \tag{3.21}$$

В формулах (3.21) пространственная распределенность приемника «Площадь прибора на грани №4» учитывается с помощью определенных интегралов по

соответствующим координатам посадочного места прибора (для координаты y - от R_{y_0} до R_{y_1} , для координаты z - от R_{z_0} до R_{z_1} , координата $x=R_1$), $(\xi_{x_1}, \xi_{y_1}, \xi_{z_1})$ – координаты источника (Точки). Рассмотрим, в качестве примера, канал передачи от грани №1 к точке контроля №1 (см. рисунок 2.4) с координатами $(R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1})$. Коэффициенты передаточной функции по каналу «Грань №1 → Точка контроля №1», в соответствии с (3.19), определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_{x_1}}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_x}{R_1}) d\xi_x \\ K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_{y_1}}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_y}{R_2}) d\xi_y \\ K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_{z_1}}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_3}{R_3}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

В формулах (3.22) пространственная распределенность источника «Площадь грани №1» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (ξ_x - от 0 до R_1 , ξ_y - от 0 до R_2 , $\xi_z = R_3$), $(R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1})$ – координаты приемника (Точки).

Аналогично определяются формулы для расчета коэффициентов передаточных функций по другим видам «Площадей».

$$\begin{aligned} K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_{x_1}}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_x}{R_1}) d\xi_x \\ K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_{y_1}}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_y}{R_2}) d\xi_y \\ K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_{z_1}}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{0}{R_3}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

В формулах (3.23) пространственная распределенность источника «Площадь грани №2» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (ξ_x - от 0 до R_1 , ξ_y - от 0 до R_2 , $\xi_z = 0$), $(R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1})$ – координаты приемника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_{x_1}}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{0}{R_1}) \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_{y_1}}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) d\xi_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_{z_1}}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) d\xi_z
\end{aligned} \tag{3.24}$$

В формулах (3.24) пространственная распределенность источника «Площадь грани №3» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (ξ_y - от 0 до R_2 , ξ_z - от 0 до R_3 , $\xi_x=0$), ($R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1}$) – координаты приемника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_{x_1}}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_1}{R_1}) \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_{y_1}}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_{y_1}}{R_2}) d\xi_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_{z_1}}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) d\xi_z
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Пространственная распределенность источника «Площадь грани №4» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты ξ_y - от 0 до R_2 , для координаты ξ_z - от 0 до R_3 , координата $\xi_x=R_1$), ($R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1}$) – координаты приемника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_{x_1}}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) d\xi_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_{y_2}}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{0}{R_2}) \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_{z_1}}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) d\xi_z
\end{aligned} \tag{3.26}$$

В формулах (3.26) пространственная распределенность источника «Площадь грани №5» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты ξ_x - от 0 до R_1 , для координаты ξ_z - от 0 до R_3 , координата $\xi_y=0$), ($R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1}$) – координаты приемника (Точки).

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_{x_1}}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_{x_1}}{R_1}) d\xi_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_{y_2}}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_2}{R_2}) \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \int_0^{R_3} \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_{z_1}}{R_3}) \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{\xi_{z_1}}{R_3}) d\xi_z
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Пространственная распределенность источника «Площадь грани №6» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты ξ_x - от 0 до R_1 , для координаты ξ_z - от 0 до R_3 , координата $\xi_y = R_2$), ($R_{x_1}, R_{y_1}, R_{z_1}$) – координаты приемника (Точки).

Коэффициенты передаточных функций по каналу «Площадь → Площадь», с учетом (2.85), например, для канала передачи «Грань №1 - грань №2» определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
K^x(x, \xi_x) &= K_n^{III}(x, \xi_x) = \frac{R_1}{a \cdot \pi^2 \cdot n^2} \cdot \int_0^{R_1} \int_0^{R_1} \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{R_x}{R_1}) \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \frac{\xi_x}{R_1}) d\xi_x dR_x \\
K^y(y, \xi_y) &= K_m^{III}(y, \xi_y) = \frac{R_2}{a \cdot \pi^2 \cdot m^2} \cdot \int_0^{R_2} \int_0^{R_2} \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{R_y}{R_2}) \cdot \cos(\pi \cdot m \cdot \frac{\xi_y}{R_2}) d\xi_y dR_y \\
K^z(z, \xi_z) &= K_\chi^{III}(z, \xi_z) = \frac{R_3}{a \cdot \pi^2 \cdot \chi^2} \cdot \cos(\pi \cdot \chi \cdot \frac{R_3}{R_3})
\end{aligned} \tag{3.28}$$

В формулах (3.28) пространственная распределенность источника «Площадь грани №1» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты ξ_x - от 0 до R_1 , для координаты ξ_y - от 0 до R_2 , координата $\xi_z = R_3$), пространственная распределенность получателя «Площадь грани №2» учитывается с помощью определенных интегралов по соответствующим координатам (для координаты x - от 0 до R_1 , для координаты y - от 0 до R_2 , координата $z = R_3$).

Для расчета коэффициентов передаточных функций по формулам (3.11) - (3.28) необходимо ввести в модель координаты соответствующих «Точек» (точки приложения мощностей УИТ, контроля температуры, крепления НК к КА, крепления оболочки к НК) и «Площадей» (площади граней НК, граней защитной оболочки, посадочных мест под объекты тепловыделения на НК и проекций оболочки на НК). Тепловые потоки элементов крепления НК задаются для имитационного моделирования в соответствии с полетным

заданием и уточняются с помощью численной конечно-элементной тепловой модели НК в среде «ANSYS» [95]. Эта же модель используется для уточняющей идентификации коэффициентов и постоянных времени передаточных функций.

3.3 Выводы по третьей главе

1. Получена модифицированная структура ФОМ в форме передаточных функций объекта управления с распределенными параметрами

2. Проведена идентификация передаточной функции объекта управления с распределенными параметрами с использованием уточненной конечно-элементной математической модели температуры НК ИИС КА. Уточнены параметры конечномерной аппроксимации передаточной функции.

3. Получены расчетные формулы для передаточных функций по всем возможным каналам теплопередачи в НК ИИС КА с учетом распределенности теплоисточников и теплоприемных поверхностей.

4 СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ НК ИИС

4.1 Обобщенная структура подсистемы управления температурой НК ИИС в составе СОТР КА

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. рис. 4.1).

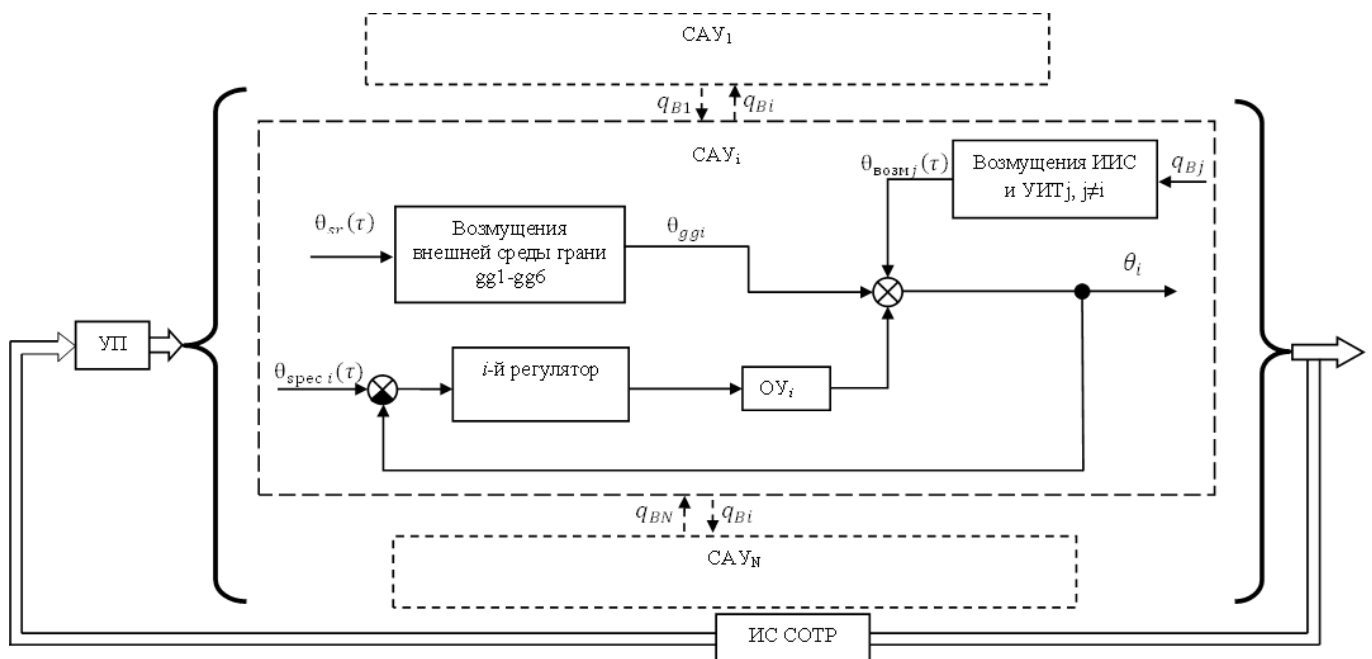


Рисунок 4.1 – Укрупненная схема подсистемы управления температурой НК в ИИС КА

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 $\theta_i(M_i, \tau)$, в i -й точке $M_i(x_i, y_i, z_i)$ на НК ИИС КА с координатами x_i, y_i, z_i воздействуют неконтролируемые тепловыделения работающих приборов ИИС и смежных САУ, неконтролируемые возмущения со стороны окружающей НК среды, включая изменения температуры оболочки $\theta_{sr}(\tau)$ космические тепловые потоки $q_{x,y,z}(\tau)$ проникающие через открывающиеся в оболочке люки. Эти возмущения компенсируются i -м локальным регулятором путем изменения мощности распределенного в зоне контроля i -го теплоисточника УИТ $_i$.

Передаточные функции по каждому из каналов ОУ для приближенного расчета определяются по формулам вида (3.10) с учетом распределенности по соответствующим областям теплоисточников (3.12)–(3.28). При этом смежные УИТ_{*i*} $i=1,2,\dots,I$ воздействуют на соседние УИТ_{*j*} $j\neq i$ соответствующими тепловыми потоками включенными в q_{Bj} как возмущения. С помощью приборов информационной системы СОТР информация о температурном состоянии всех *N* контролируемых точек НК передается в управляющую подсистему (УП) СОТР для формирования алгоритма управления. Управляющая супервизорная программа (УП) реализует алгоритм управления соответствующим *i*-м УИТ_{*i*} с помощью локального *i*-го регулятора, обеспечивающего требуемое значение температуры $\theta_i(M_i, \tau)$ в каждой из $M_i(x_i, y_i, z_i)$, $i=\overline{1, N}$ контрольных точек НК. Отклонение температуры $\theta_i(\tau)$ в каждой *i*-й точке от требуемой θ_{spec_i} вызывается воздействием неконтролируемых возмущений θ_{sr} со стороны окружающего НК пространства внутри кожуха и возмущений q_{Bj} со стороны смежных *j*-ых, $j\neq i$ регуляторов и тепловыделяющей аппаратуры ИИС.

На рисунке 4.2 представлена детализация структуры локальной САУ температурой точки контроля M_l . С использованием полученных передаточных функций воздействие теплообмена на соответствующих *i*-ых гранях НК на точку M_l отражается блоками G_{gg} .

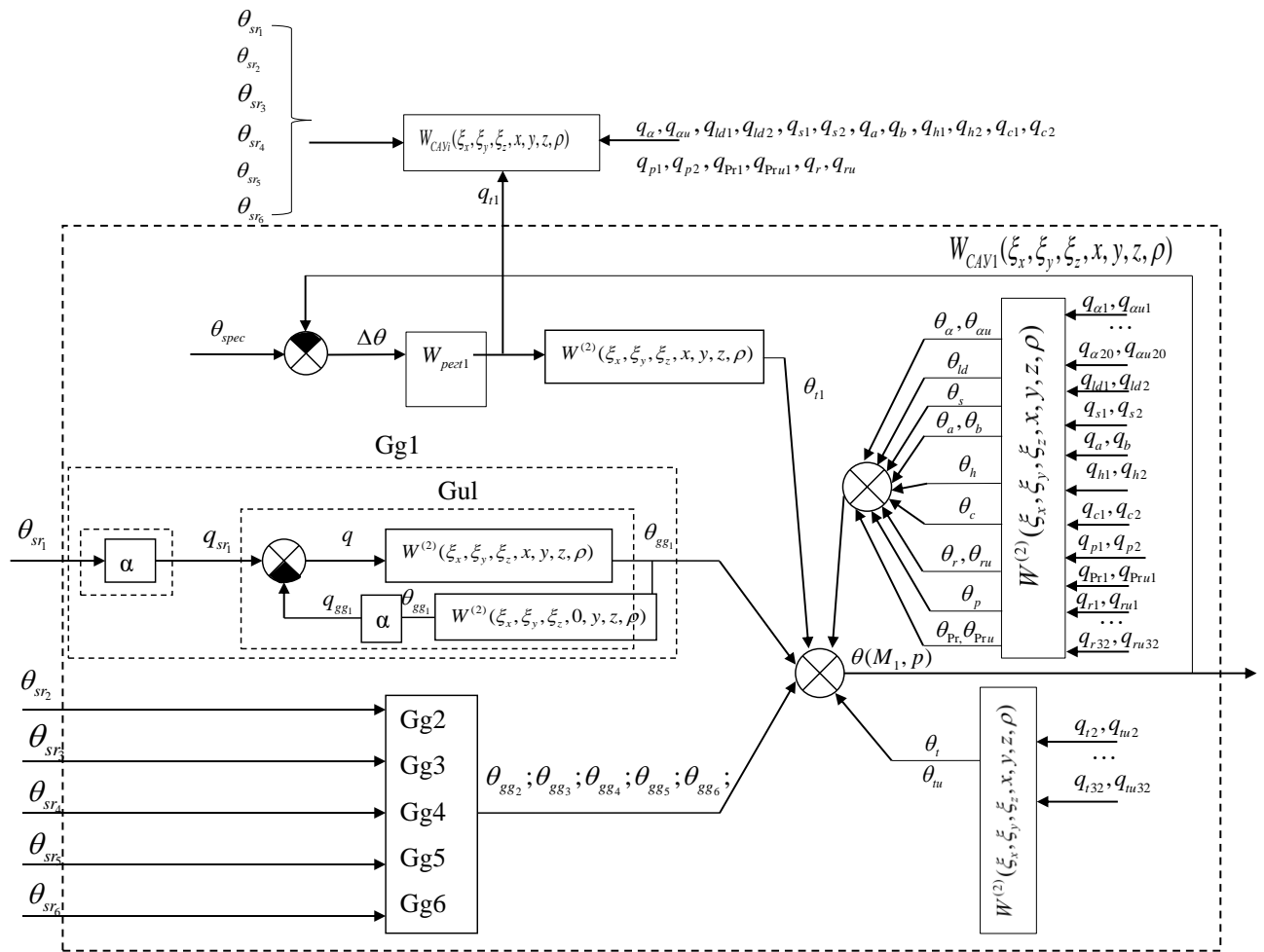


Рисунок 4.2 – Структурная схема локальной САУ температурой точки контроля M_1

На рисунках 4.2 и 4.3 приняты следующие обозначения:

θ_{spec_i} - требуемая температура соответствующей i -й точки $M_i(x_i, y_i, z_i)$

поверхности НК, которую необходимо поддерживать во время работы КА с заданной погрешностью;

$\theta_{sr_1}; \theta_{sr_2}; \theta_{sr_3}; \theta_{sr_4}; \theta_{sr_5}; \theta_{sr_6}$ - температуры ограждающих поверхностей, совпадающих по номерам с соответствующими гранями gg1-gg6 НК;

$q_{gg_1} - q_{gg_6}$ - суммарный тепловой поток на грани gg1-gg6;

$\theta_{gg_1} - \theta_{gg_6}$ - температура соответствующей грани gg1-gg6;

Gg1- Gg6 – блоки компоненты температуры $\theta_{gg_1} - \theta_{gg_6}$ граней gg1-gg6 соответственно;

$W^{(2)}(\xi_x, \xi_y, \xi_z, x, y, z, \rho)$ - передаточная функция распределенного ОУ в форме, аналогичной (3.10) (см. рисунок 3.1), коэффициенты которой определяются по формулам (3.11) -(3.28) и уточняются путем параметрической идентификации (см. приложение 2);

$G_{u1}-G_{u6}$ – блок температуры граней gg_1-gg_6 по каналу «поток-температура грани»;

$G_{g1}-G_{g6}$ – блок температуры граней gg_1-gg_6 по каналу «температура среды-температура грани»;

$\theta_{gg_2}(p); \theta_{gg_3}(p); \theta_{gg_4}(p); \theta_{gg_5}(p); \theta_{gg_6}(p)$ - компонента температуры в точке M_i от граней gg_2-gg_6 ;

$\theta_i(p); \theta_{ld}(p); \theta_s(p); \theta_a(p); \theta_b(p); \theta_h(p); \theta_c(p); \theta_r(p); \theta_{Pr}(p); \theta_{Pru}(p)$

$\theta_{ru}(p); \theta_p(p);$ - компоненты регулируемой температуры в контрольной точке от воздействия соответствующих потоков тепла;

$\theta(M_i, p)$ - температура в точке контроля M_i ;

$W_{pezi}(p)$ - передаточная функция i -го регулятора температуры; $i=1-64$.

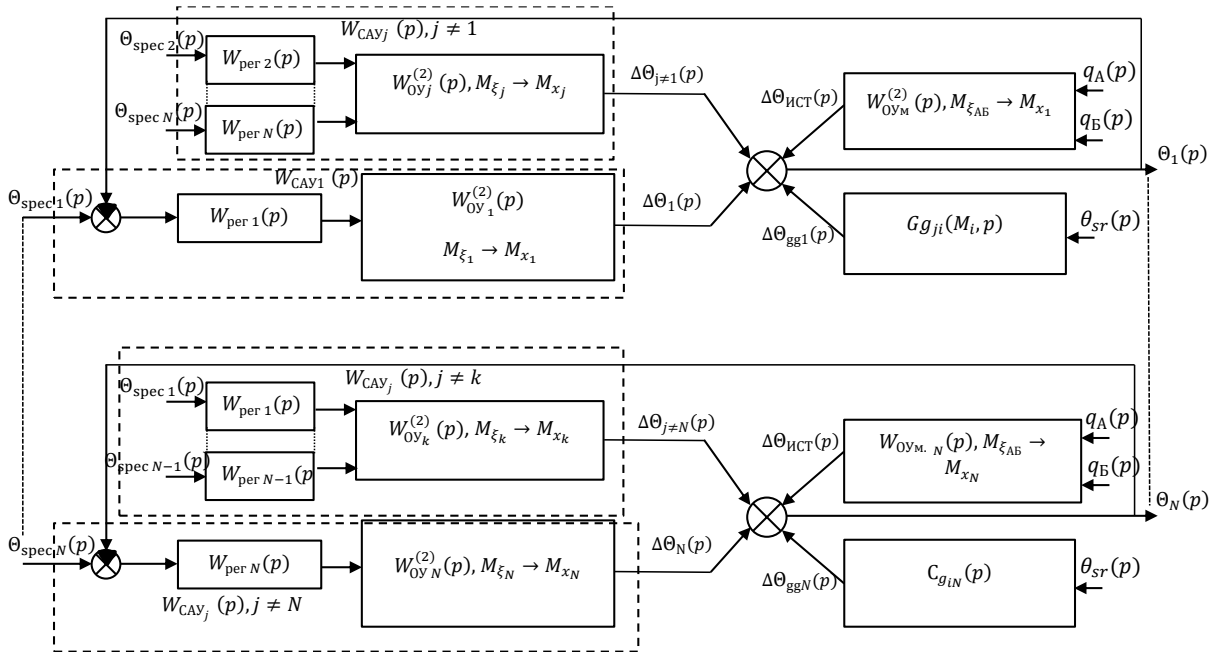


Рисунок 4.3 – Структурная схема подсистемы автоматического управления тепловым режимом НК ИИС КА, состоящая из локальных САУ температурой N контрольных точек M_i $i = \overline{1, N}$

Каждая локальная САУ $_i$, обеспечивающая стабилизацию заданной со стороны УУ температуры в i -ой точке M_i , представляет собой замкнутую по отклонению САУ

стабилизации, причем в качестве объекта управления рассматриваются ОРП в форме (3.10) (см. рисунок 3.1).

Передаточные функции $W_{OY_i}(p)$ объекта по каналу управления и передаточные функции объекта $W_{ИСТ_N}(p)$, $G_{gji}(p)$ получены соответствующим преобразованием структурной схемы объекта (см. рис. 2.9)

$$W_{OY} = [a(dp^3 + ep^2 + ip + j)(wp + 1)(vp + 1)(gp + 1)(zp + 1)(fp + 1)(np + 1) + b(kp^3 + lp^2 + mp + h)(sp + 1)(tp + 1)(up + 1)(zp + 1)(fp + 1)(np + 1) + c(op^3 + \varphi p^2 + qp + r)(sp + 1)(tp + 1)(up + 1)(wp + 1)(vp + 1)(gp + 1)] [p(sp + 1)(tp + 1)(up + 1)(wp + 1)(vp + 1)(gp + 1)(zp + 1)(fp + 1)(np + 1)]^{-1} = \left(\sum_{i=1}^9 (\lambda_i p^i + 1) \right) \left[p \prod_{j=1}^{\infty} (p_j + 1) \right]^{-1} \quad (4.1)$$

где:

$$e = T_{x1} \times T_{x2} + T_{x1} \times T_{x3} + T_{x2} \times T_{x3} + k_1(x) \times T_{x2} + k_1(x) \times T_{x3} + k_3(x) \times T_{x1} + k_2(x) \times T_{x1} + k_2(x) \times T_{x3} + k_3(x) \times T_{x2}; \quad d = T_{x1} \times T_{x2} \times T_{x3} + k_1(x) \times T_{x2} \times T_{x3} + k_3(x) \times T_{x1} \times T_{x2} + k_2(x) \times T_{x1} \times T_{x3}$$

$$l = T_{y1} \times T_{y2} + T_{y1} \times T_{y3} + T_{y2} \times T_{y3} + k_1(y) \times T_{y2} + k_1(y) \times T_{y3} + k_3(y) \times T_{y1} + k_2(y) \times T_{y1} + k_2(y) \times T_{y3} + k_3(y) \times T_{y2}; \quad o = T_{z1} \times T_{z2} \times T_{z3} + k_1(z) \times T_{z2} \times T_{z3} + k_3(z) \times T_{z1} \times T_{z2} + k_2(z) \times T_{z1} \times T_{z3}$$

$$\varphi = T_{z1} \times T_{z2} + T_{z1} \times T_{z3} + T_{z2} \times T_{z3} + k_1(z) \times T_{z2} + k_1(z) \times T_{z3} + k_3(z) \times T_{z1} + k_2(z) \times T_{z1} + k_2(z) \times T_{z3} + k_3(z) \times T_{z2}; \quad w = T_{y1}; \quad v = T_{y2}; \quad z = T_{z1}; \quad f = T_{z2};$$

$$i = T_{x1} + T_{x2} + T_{x3} + k_1(x) + k_2(x) + k_3(x) \quad s = T_{x1}; \quad t = T_{x2}; \quad u = T_{x3}; \quad j = 1; \quad h = 1; \quad r = 1; \quad g = T_{y3};$$

$$n = T_{z3}; \quad k = T_{y1} \times T_{y2} \times T_{y3} + k_1(y) \times T_{y2} \times T_{y3} + k_3(y) \times T_{y1} \times T_{y2} + k_2(y) \times T_{y1} \times T_{y3};$$

$$q = T_{z1} + T_{z2} + T_{z3} + k_1(z) + k_2(z) + k_3(z); \quad m = T_{y1} + T_{y2} + T_{y3} + k_1(y) + k_2(y) + k_3(y).$$

Для каждой i -й передаточной функции $W_{OY_j}^{(2)}(p) - W_{OY_M}^{(2)}(p)$ коэффициенты K_x , K_y , K_z определяются по варианту “Точка-Точка” по формулам (3.11) в соответствии с координатами ξ точки M источника и контролируемой точки и уточняются в ходе идентификации (см. приложение 1). Для передаточных функций $Gg_{ij}(p)$ эти коэффициенты определяются по варианту “Площадь-Точка” в соответствии с формулами (3.22) -(3.26).

$$\text{Коэффициенты } K_1^{(i)}(x_i, \xi_{x_i}), \quad K_2^{(i)}(x_i, \xi_{x_i}), \quad K_3^{(i)}(x_i, \xi_{x_i}), \quad K_1^{(i)}(y_i, \xi_{y_i}), \quad K_2^{(i)}(y_i, \xi_{y_i}), \\ K_3^{(i)}(y_i, \xi_{y_i}), \quad K_1^{(i)}(z_i, \xi_{z_i}), \quad K_2^{(i)}(z_i, \xi_{z_i}), \quad K_3^{(i)}(z_i, \xi_{z_i}), \quad T_{x_{1i}}, T_{x_{2i}}, T_{x_{3i}}, T_{y_{1i}}, T_{y_{2i}}, T_{y_{3i}}, T_{z_{1i}}, T_{z_{2i}}, T_{z_{3i}} \text{ в}$$

соответствии с формулами (3.11) зависят от координат $\xi_{x_j}, \xi_{y_j}, \xi_{z_j}$ входящего j -го потока $q_{\beta j}(\xi_{xj}, \xi_{yj}, \xi_{zj}, \tau)$, $q_{tj}(\xi_{xj}, \xi_{yj}, \xi_{zj}, \tau)$ и $q_{tu j}(\xi_{xj}, \xi_{yj}, \xi_{zj}, \tau)$ и координат x_i, y_i, z_i i -ой точки контроля. Координаты $\xi_{x_j}, \xi_{y_j}, \xi_{z_j}$ размещения 16-ти наиболее сильно влияющих на термомодеформацию НК ответственных УИТ и расположенных рядом точек x_i, y_i, z_i контроля приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – координаты точек УИТ

Номер УИТ, t,tu	ξ_x	ξ_y	ξ_z
t1	0,15	1,83	1,40
tu1	0	1,81	1,47
t2	0,15	1,92	0,43
tu2	0	1,83	0,56
t3	0,15	1,30	0,49
tu3	0	1,33	0,59
t4	0,15	1,33	1,37
tu4	0	1,30	1,47
t5	0,15	0,94	1,20
tu5	0	0,95	1,28
t6	0,15	0,94	0,67
tu6	0	0,93	0,76
t7	0,07	0,06	-0,05
tu7	0,07	0,06	2,02
t8	0,15	1,61	1,82
tu8	0	1,61	0,15

Рассчитанные по формулам (3.11) и уточненные в ходе идентификации постоянные времени $T_{x_{1i}}, T_{x_{2i}}, T_{x_{3i}}, T_{y_{1i}}, T_{y_{2i}}, T_{y_{3i}}, T_{z_{1i}}, T_{z_{2i}}, T_{z_{3i}}$ и коэффициенты $K_1^{(i)}(x_i, \xi_{x_i}), K_2^{(i)}(x_i, \xi_{x_i}), K_3^{(i)}(x_i, \xi_{x_i}), K_1^{(i)}(y_i, \xi_{y_i}), K_2^{(i)}(y_i, \xi_{y_i}), K_3^{(i)}(y_i, \xi_{y_i}), K_1^{(i)}(z_i, \xi_{z_i}), K_2^{(i)}(z_i, \xi_{z_i}), K_3^{(i)}(z_i, \xi_{z_i})$ приведены в таблицах приложения 1 (табл. П1-П7)

Заданная УУ для i -ой точки $M(x_i, y_i, z_i) = M_i$ НК соответствующая температура $\theta_{spec_i}(p) - \theta(M_i, p)$ сравнивается с сигналом обратной связи температуры $\theta(M_i, p)$ i -ой точки M_i и рассогласование $\Delta\theta = \theta_{spec_i}(p) - \theta(M_i, p)$ через передаточную функцию i -го регулятора $W_{pec_i}(p)$ воздействует на температуру $\theta(M_i, p)$ этой i -ой точки НК в соответствии с распределенной передаточной функцией (4.4) ОУ $W_{OU}^{(2)}(\xi_{x_i}, M_i, p)$.

При этом на температуру $\theta(M_i, p)$ в i -ой точке НК действуют возмущающие воздействия со стороны систем управления САУ $_j$ $W_{CAU_j}(p)$ $i \neq j$, другими точками НК и неуправляемые тепловыделения аппаратуры $q_A(p)$ и $q_B(p)$ (см. рис. 4.3), работающей по различным циклограммам (см. рис. 2.3) в соответствии с передаточными функциями $W^{(2)}(M_i, p)$ и тепловыделения в точках крепления НК $q_D(p)$. Кроме того, возмущающим

воздействием является тепловое воздействие $\theta_{sr}(p)$ соответствующих граней через звенья Gg (см. рис. 4.2) с передаточными функциями $Gg_{ij}(p)$ (см. рис. 4.3).

Перечисленные виды воздействий агрегировано отражают влияние на ММ (2.6), (2.29) отдельных компонент (2.14) – (2.29) стандартизирующей функции (2.17) и в форме соответствующих составляющих образуют температуру $\theta_i(M_i, p)$ в регулируемых i точках $M_i(x_i, y_i, z_i)$ НК $i=1,2,\dots,N$.

4.2 Синтез локальной САУ температурой НК ИИС

В разработанной подсистеме управления (рис. 4.1, рис. 4.2 и рис. 4.3) температурным режимом НК ИИС существенную роль играют локальные системы автоматического управления температурой соответствующей i -ой зоны САУ i .

Именно эти системы обеспечивают отработку заданных температурных режимов, обеспечивая их стабильность в условиях неконтролируемых возмущений.

В структурной схеме САУ (см. рис. 4.3) регулятор целесообразно строить с переменной структурой. Для повышения быстродействия при большом отклонении $\Delta\theta_i(t) = \theta_i(t) - \theta_{spec_i}(t)$ температура $\theta_i(t)$ в регулируемой i -й точке M_i от заданного значения $\theta_{spec_i}(t)$ регулятор работает в релейном режиме, а при малых рассогласованиях $\Delta\theta_i(t)$ по непрерывному, например пропорционально-интегральному (ПИ) алгоритму.

Таким образом каждая i -я локальная САУ вне области релейного регулирования с точки зрения синтеза представляет собой структуру, представленную на рисунке 4.4

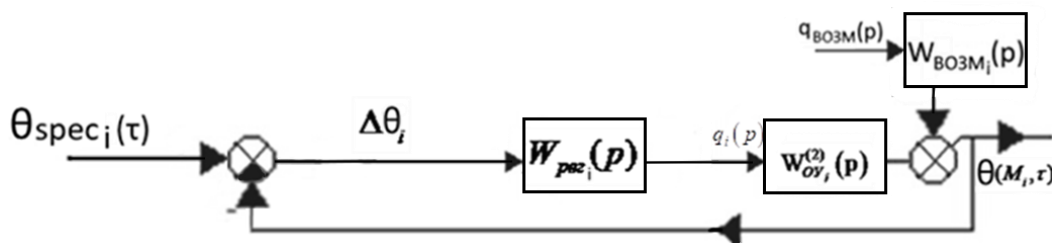


Рисунок 4.4 – Расчетная структурная схема локальной САУ

В этой структуре $q_{возм}(p)$ - интегрированное значение всех возмущающих потоков приведенное к выходу САУ $q_A(p)$ и $q_B(p)$.

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

$$W_{pez}(p) = W_{pez}^{ПИ}(p) = K_p^{ПИ} \frac{T_p^{ПИ} p + 1}{T_p^{ПИ} p}; \quad W_{pez}^{ПИД}(p) = K_p^{ПИД} \frac{T_p^{ПИД} p + T_p^{ПИД} T_D^{ПИД} p^2 + 1}{T_p^{ПИД} p} \quad (4.2)$$

воздействующего на объект с передаточной функцией $W_{OVi}(p)$ (4.1), структура которой приведена на рисунке 3.1. Выбор пропорционально-интегрального (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона регулирования в (4.5) определяется в ходе синтеза системы стандартными средствами программного средства «Matlab» из условия удовлетворения требованиям качества САУ (см. гл. 3). При этом каждая локальная САУ_{*i*} (см рис. 4.3) стабилизирует температуру в *i*-й точке НК и имеет передаточную функцию по *i*-му каналу управления:

$$W_{CAVi}^y(p) = \frac{W_{OVi}^{(2)}(p)}{1 + W_{PEVi}(p) W_{OVi}^{(2)}(p)} \quad (4.3)$$

Обратная отрицательная связь по отклонению температуры $\theta_i(x_i, y_i, z_i, \tau)$ от заданной $\theta_{speci}(\tau)$ управляющим устройством УУ (рис 3.2) в соответствии с алгоритмом обеспечивает компенсацию возмущений $q_{603M}(\tau)$ 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 открытием, и закрытием люков в оболочке, изменением теплообмена в точках крепления НК, воздействием средней температуры всех 6-и граней призмы $\theta_{sr}(\tau)$ в соответствии с передаточной функцией по каналу возмущения:

$$W_{CAVi}^6(p) = \frac{W_{BO3Mi}(p)}{1 + W_{PEVi}(p) W_{OVi}^{(2)}(p)} \quad (4.4)$$

где передаточная функция $W_{BO3Mi}(p)$ имеет вид (4.4) для отдельных видов возмущения:

$$W_{BO3Mi}(p) = \begin{cases} W_{OVi}^{(2)}(p), j \neq i, q_A(p) = q_{ij}(p) = q_{nij}(p) \\ W^{(2)}(p), j \neq i, q_B(p) = q_{ld_{1,2}}(p), q_{P_{a,b}}(p), q_{P_{r_{1-4}}}(p), \\ q_{P_{1,2}}(p), q_{\alpha_k}(p), q_{\alpha_{uk}}(p), q_{s_{1,2}}(p), q_{h_{1,2}}(p), q_c(p), q_r(p), q_{ru_r}(p) \\ G_{g_j}(M_i, p), g = \overline{1, 6}, j = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4.5)$$

Таким образом, работоспособность всей подсистемы в значительной степени определяется качеством работы локальной i -ой САУ; температурой $\theta_i(\tau) = \theta(M_i, \tau)$ в каждой i -ой $i = \overline{1, N}$, точки НК.

Проблему синтеза САУ температурой НК ИИС можно рассматривать с нескольких позиций. Прежде всего, отметим, что в спроектированном КА тепловыделяющие компоненты ИИС распределены по поверхности НК известным и определенным образом, а циклограмма их работы, а значит и тепловыделения, содержит как детерминированную, так и случайную составляющие. Это же относится к прямым и отраженным от планет тепловым потокам на поверхности НК при открытии соответствующих люков ограждения (см. табл. 2.1). Все эти тепловыделения, включая также влияние смежных регулируемых УИТ будем считать неконтролируемыми возмущениями $q_{возм}(\tau)$ в синтезируемой САУ. Если проблема синтеза САУ решается на этапе проектирования, то в широком смысле слова стоит задача определения и реализации дискретно распределенного управления, в качестве компонент которого рассматриваются функции пространственного распределения $V_{ii}(x, y)$ и $V_{iui}(x, y)$ алгоритм изменения во времени мощности УИТ $q_{ii}(\tau)$ и $q_{iui}(\tau)$ (см. (2.14)-(2.29)), обеспечивающий допустимый по термодформации уровень $|\Delta\theta| \leq \varepsilon_{зад}$ отклонения температурного поля НК $\theta(M, \tau)$ от заданного $\theta_{spec}(\tau)$.

При этом если управление реализуется автоматически, обеспечивая в условиях выполнения ограничений (3.3) допустимый уровень динамических σ -перерегулирование, ψ -степень затухания и статических $\varepsilon_{зад}$ критериев качества, можно констатировать решение задачи автоматической термоградиентной размерной стабилизации. Если автоматически обеспечить экстремум любого из этих критериев, будет решена соответствующая оптимальная задача.

В настоящей главе диссертации рассматривается синтез САУ для заранее спроектированной НК, когда пространственное распределение $V_{ii}(x, y)$ и $V_{iui}(x, y)$ УИТ задано и проблема сводится к определению и реализации сосредоточенного в пространственной области управления мощностью

$$p_i(\tau) = q_{ii}(\tau)S_{ii} = q_{iui}S_{iui} \quad (4.6)$$

располагаемых в этой области УИТ, обеспечивая при этом требуемый уровень $\varepsilon_{зад}$ термоградиента в НК при наиболее неблагоприятном сочетании возмущающих факторов при обеспечении требуемого уровня динамических показателей качества $\sigma \leq 30\%$, $\psi \geq 97\%$.

Методика синтеза базируется на конечномерной аппроксимации (4.1) (см. рис. 3.1) бесконечномерной трансформанты Лапласа, соответствующей функции Грина (3.9) [43]. Расчетные параметры САУ уточняются на имитационной конечно-элементной модели, реализованной в программной среде «ANSYS» и свободной от допущений (см. гл. 2).

На рисунке 2.4 схематично показано расположение точек контроля температуры, расположенных в непосредственно близости (на одной подложке) с УИТ.

Постоянные времени определяются по формулам (3.11) уточняются путем параметрической идентификации и сведены в таблицу П1 приложения 1. Расчетные тепловые схемы тепловыделяющей аппаратуры ИИС и других теплоисточников приведены на рис. 2.5-2.9. Коэффициенты передаточных функций (4.1)-(4.3) определяются путем преобразования структурных схем (2.9) (рис. 4.2) (рис. 4.3) и сведены в таблицы П2 и П3-П7 приложения 1.

4.3 Простейший алгоритм автоматического управления температурой НК ИИС КА

На рисунке 4.5 представлен предложенный простейший обобщённый алгоритм работы подсистемы управления температурой НК ИИС (ПУТ) с регулятором переменной структуры, реализующим в режиме реального времени, в зависимости от величины рассогласования релейный и, пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования. Алгоритм работает в режиме реального времени.

Точки контроля температуры расположены в непосредственной близости УИТ. В каждый j -ый момент времени τ_j , производится вычисление максимальной температуры T_{max} поверхности НК. Сигнал с датчиков температуры поступает в УУ, в котором на каждом i -ом шаге вычисляется величина рассогласования $\Delta T_s(\tau_j) = T_{max}(\tau_j) - T_s(\tau_j)$ между максимальной температурой $T(\tau_j)_{max}$ и температурой в s -й точке контроля $T_s(\tau_j)$. Это рассогласование $\Delta T_s(\tau_j)$ сравнивается с пороговым значением температуры T_n , которое соответствует переключению регулятора между релейным и ПИ- законом регулирования.

Если $\Delta T_s(\tau_j) > n$, то работает релейная часть регулятора температуры $T_s(\tau_j)$ в соответствующей зоне s регулятора, формирующая максимальную мощность на элементе УИТ s - $P_s(\tau_j) = P_{max}$. Если $\Delta T_s(\tau_j) \leq T_n$, то значение $\Delta T_s(\tau_j)$, с учетом шага дискретизации интегрирования по времени $\Delta \tau_j$, участвует в формировании ПИ-закона регулирования. Мощность $P_s(\tau_j)$ элементов ограничивается естественным ограничением $0 \leq P_s(\tau_j) \leq P_{max}$, где $P_{max} = 30$ Вт максимально допустимое значение (см. раздел 3.1). В управляющем устройстве УУ формируется уровень рабочей мощности каждого элемента УИТ, в зависимости от значения $\Delta T_s(\tau_j)$. При достижении температурой $T_s(\tau_j)$ зоны нечувствительности T_{min} процесс регулирования останавливается.

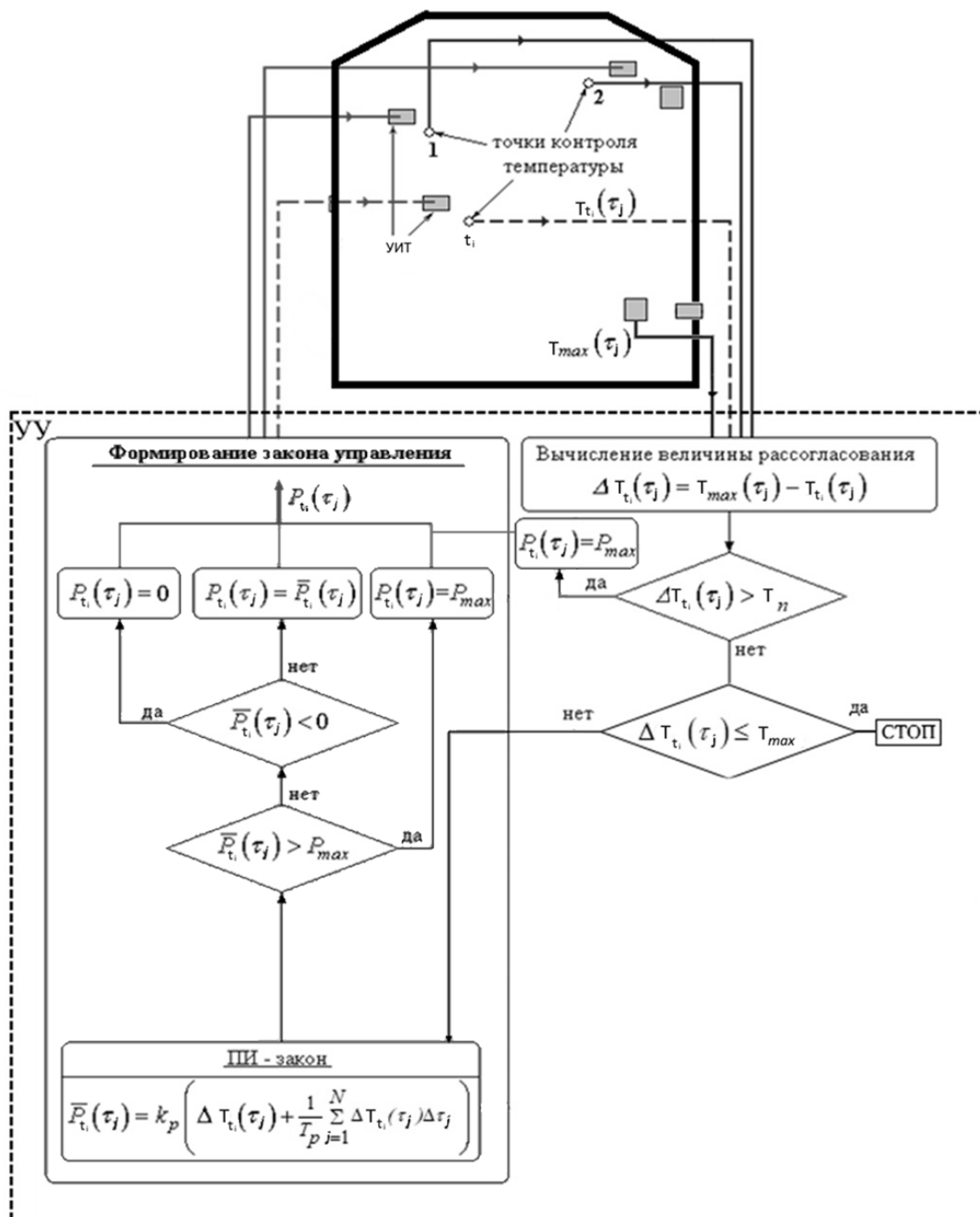


Рисунок 4.5 – Простейший обобщённый алгоритм работы подсистемы управления температурой НК ИИС КА с ПИ-регулятором

4.4 Линейный анализ локальной САУ температурой НК ИИС КА

САУ построена на основе регулятора с переменной структурой. При больших отклонениях от заданной УУ температуры θ_{spec} (в абсолютных значениях T_{spec}), регулятор обрабатывает релейный закон для повышения быстродействия системы.

$$P_s(\tau) = \begin{cases} P_{max}, \Delta T \geq \Delta T_{max}, P_s \geq P_{max} \\ k_p \cdot \Delta T(\tau) + \frac{k_p}{T_p} \int_0^{\infty} \Delta T(\tau) d\tau, \varepsilon \leq \Delta T < \Delta T_{max} \\ 0, \Delta T < \varepsilon, P_s \leq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Величина ε характеризует зону нечувствительности регулятора ($\varepsilon = 3K$).

По существу, в условиях $\Delta T \geq T_n$, когда рассогласование между максимальной $T(\tau_i)_{max}$ и текущей температурой в точке регулирования $T_s(\tau_i)$ велико, используется одноинтервальное оптимальное по критерию максимального быстродействия [10,11,39] управление.

В силу тривиальности релейной части САУ (4.7) сосредоточимся на синтезе непрерывного регулятора.

В связи с достаточно высокой частотой $\omega_{опроса} \geq 2\omega_{max}$ опроса датчиков по сравнению с предельной частотой пропускания ω_{max} , будем в соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона использовать для анализа непрерывный ПИ-закон регулирования:

$$P_s(\tau) = k_p \cdot \Delta T(\tau) + \frac{k_p}{T_p} \int_0^{\infty} \Delta T(\tau) d\tau, \varepsilon \leq \Delta T < \Delta T_{max} \quad (4.8)$$

а не его дискретную аналогию. Оставляя в стороне обсуждение известных преимуществ ПИ и ПИД-законов регулирования, в частности минимизацию дисперсии ошибки при Гауссовом распределении помех, ограничимся указанием на основное преимущество, например ПИ-закона регулирования в рассматриваемом случае.

На рисунке 4.6 приведена ЛФЧХ ОУ (4.1). Очевидно, что несмотря на сложный характер динамические характеристики ОУ не имеют особенностей, затрудняющих синтез САУ.

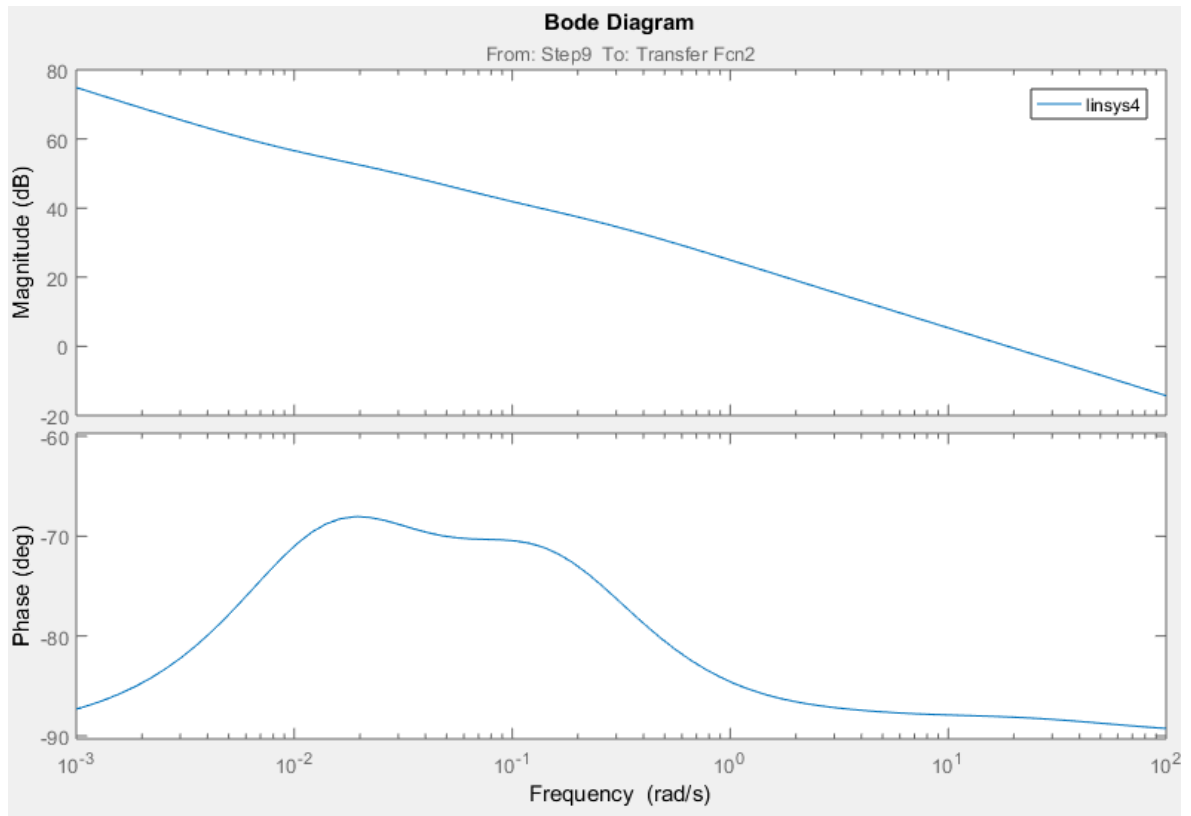


Рисунок 4.6 – ЛФЧХ ОУ

В связи с астатическим характером передаточной функции (4.1) объекта управления $W_{OY}^{(2)}(p)$ даже П-закон регулирования обеспечивает нулевую статическую ошибку при постоянном во времени управлении. Однако, в силу астатического характера передаточной функции $W_{ВОЗМ_i}(p)$ (4.4), динамический характер возмущения на выходе ОУ (см. рис. 4.5) в этом случае приведет к ненулевой ошибке по скорости изменения выходного сигнала даже при постоянном возмущении $q_{ВОЗМ}(\tau)$. Это существенно для работы управляющего алгоритма САУ. Ситуация осложняется тем, что возмущения $q_{ВОЗМ}(\tau)$ со стороны тепловыделяющей аппаратуры, смежных регуляторов сами содержат значительную динамическую компоненту. Это связано со спецификой работы ИИС КА, с циклическим характером значительной части возмущений из-за орбитальной локации КА. Поэтому будем использовать в структуре САУ ПИ и ПИД-регуляторы. Особенностью ПИ и ПИД-регуляторов является широкий диапазон допустимых настроек. Однако при численной реализации следует использовать достаточно мелкий шаг дискретизации интегральной части для обеспечения устойчивости.

4.5. Моделирование локальной САУ температуры НК ИИС

Для расчета параметров регулятора САУ и анализа ее статических и динамических свойств воспользуемся разделом «Simulink» программного пакета «Matlab». На рисунке (4.7) представлена схема моделирования САУ температурой одной из точек контроля для определения настроек ПИ-регулятора (4.5) $K_p^{ПИ}$ и $T_p^{ПИ}$ в линейной области работы САУ в программной среде «MATLAB» в разделе «Simulink».

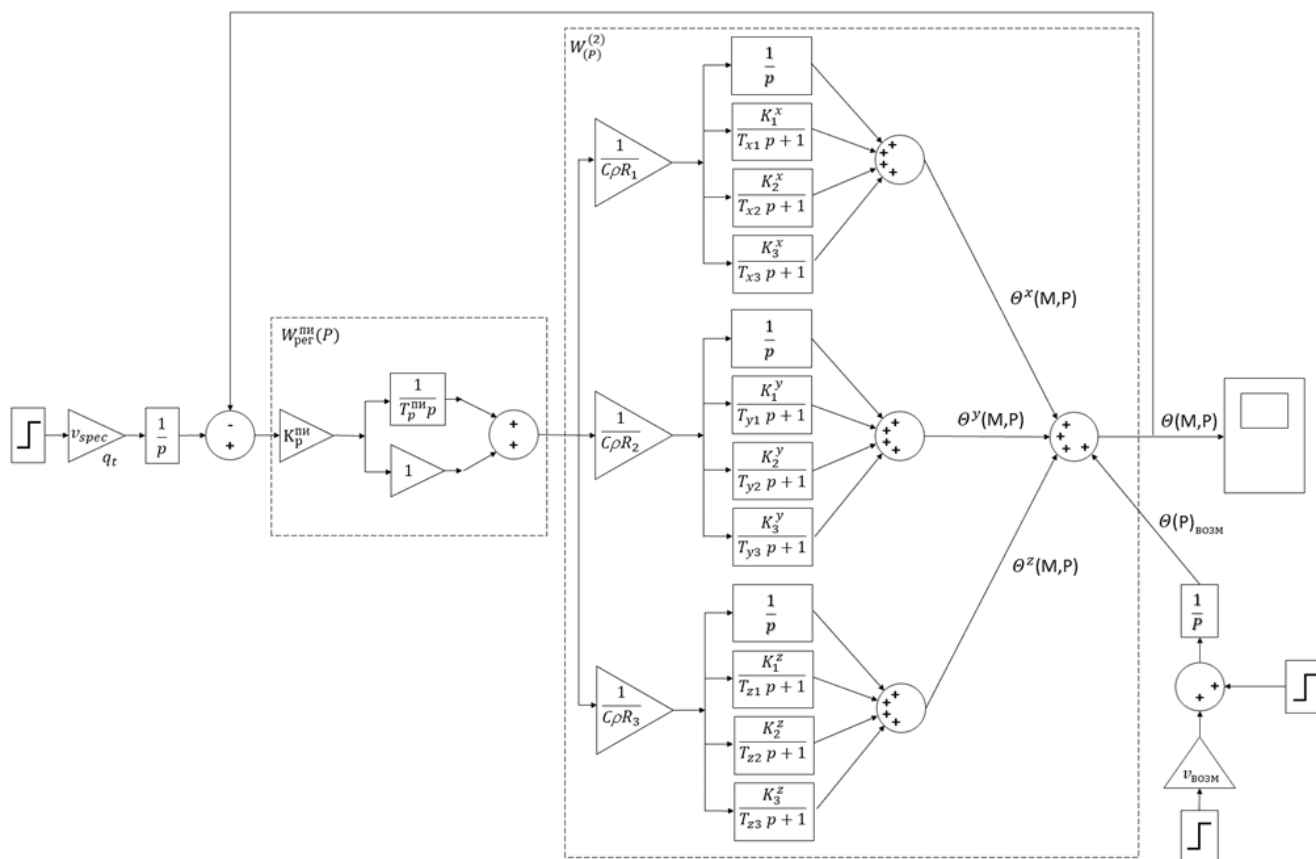


Рисунок 4.7 – Расчетная схема моделирования локальной САУ

С помощью коэффициента v_{spec} моделируется скорость нарастания входного сигнала $\theta_{spec}(\tau)$, а с помощью $v_{возм}$ -сигнала возмущения $\theta_{возм}(\tau)$. Для моделирования этих сигналов в форме функции Хевисайда $1(\tau)$ блок $\frac{1}{p}$ исключается из схемы.

Настройка параметров ПИ-регулятора $W_{рег}^{ПИ}$ производится с помощью программного модуля «Simulink» системы «MATLAB» из условия удовлетворения заданным показателям качества САУ: переуправление $\sigma \leq 30\%$, степень затухания $\psi \geq 97\%$, $\Delta T|_{\tau=\tau_k} \leq 4^\circ K, \tau_k \rightarrow \min$. При этом необходимо обеспечить в установившемся

режиме работы САУ $\tau_k \rightarrow \infty$ нулевую статическую ошибку $\Delta T|_{\tau_k \rightarrow \infty} = 0$ для возмущения в форме функции Хевисайда (с нулевой скоростью). Кроме того, несмотря на допустимость некоторого перерегулирования и колебательности следует, по возможности, пытаться исключить такие режимы работы САУ как нежелательные.

На рис.4.8 представлены параметры ПИ-регулятора и результаты моделирования переходного процесса в САУ а) при единичном управлении в относительных единицах, б) при линейно нарастающем управлении.

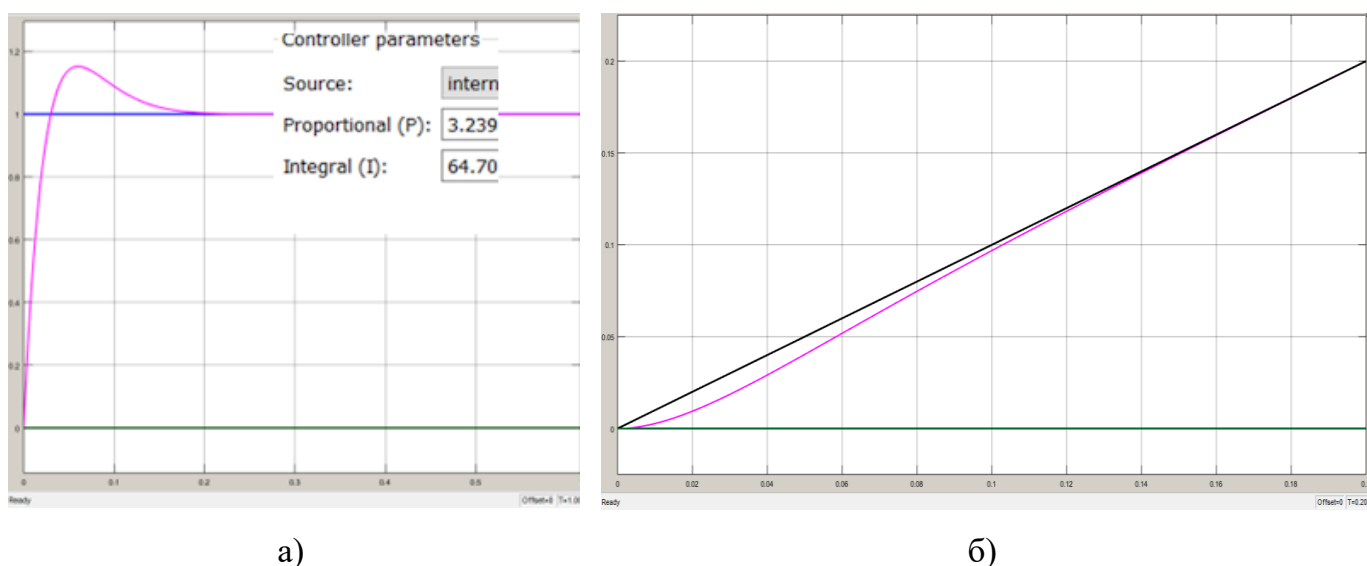


Рисунок 4.8 – а) Переходный процесс по управлению в точке 1 б) Реакция САУ с ПИ-регулятором на линейно нарастающий сигнал управления в точке 1

Для других контрольных точек при настройках ПИ регулятора, приведённых в таблице 4.2 получены аналогичные удовлетворительные результаты, отвечающие требованиям по показателям качества.

Таблица 4.2 – параметры настройки ПИ-регулятора

№ контрольной 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

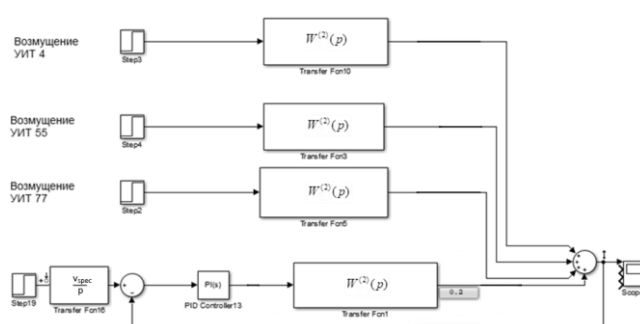


Рисунок 4.9 – Схема моделирования в «Matlab-Simulink» САУ с возмущениями от смежных регуляторов

№ контрольной точки	$K_p^{ПИ}$	$T_p^{ПИ}$
tu4	2,7	200
t5	2,9	270
tu5	2,6	235
t6	2,4	210
tu6	2,1	180

На рисунках 4.10-4.13 представлены результаты линейного анализа в системе Matlab Simulink локальной САУ; схема моделирования, которой представлена на рисунке 4.7

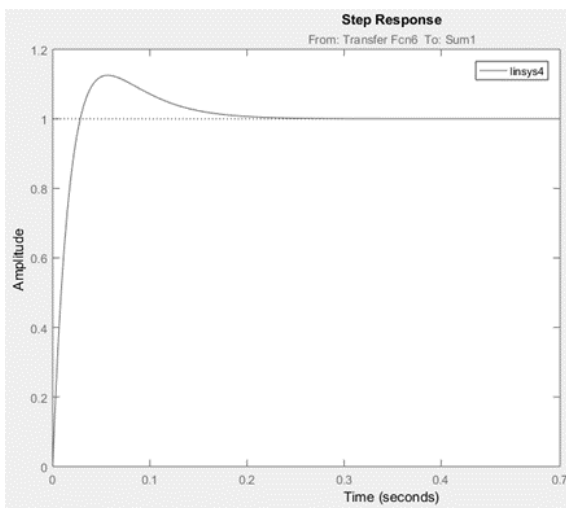


Рисунок 4.10 – Переходная характеристика замкнутой системы по управлению

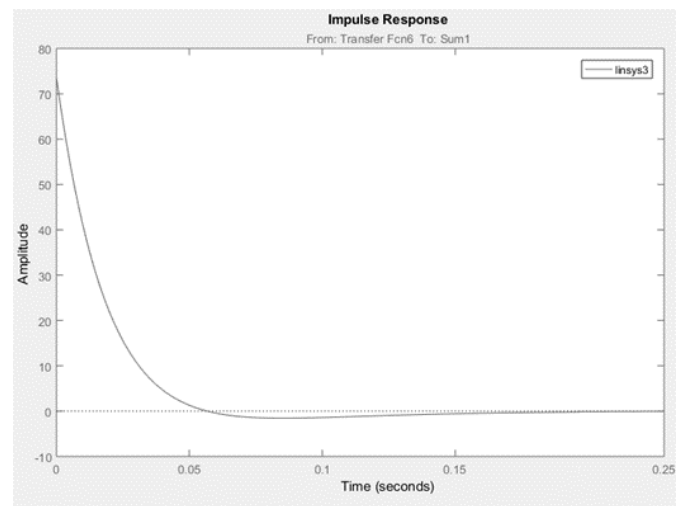


Рисунок 4.11 – Импульсная переходная характеристика САУ

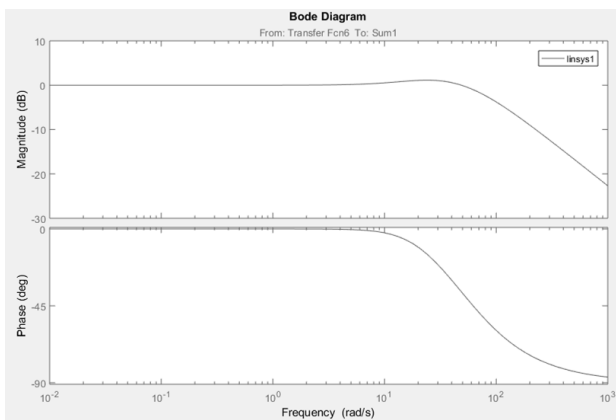


Рисунок 4.12 – Логарифмические частотные характеристики САУ

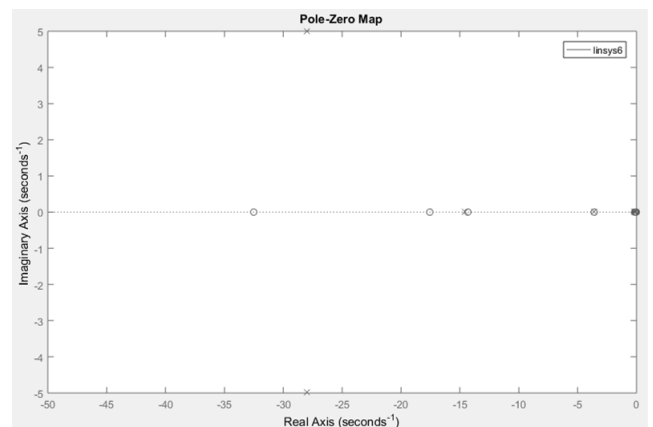


Рисунок 4.13 – Корневой годограф САУ

Очевидно, что несмотря на сложную структуру ОУ (4.1) его характеристики после конечномерной аппроксимации позволяют строить достаточно простые локальные САУ с ПИ и ПИД регуляторами.

Для линейно нарастающих сигналов, характеризующих типовые возмущения для точки M_I НК ИИС КА вида (4.1) на рисунке 4.14 приведены результаты моделирования.

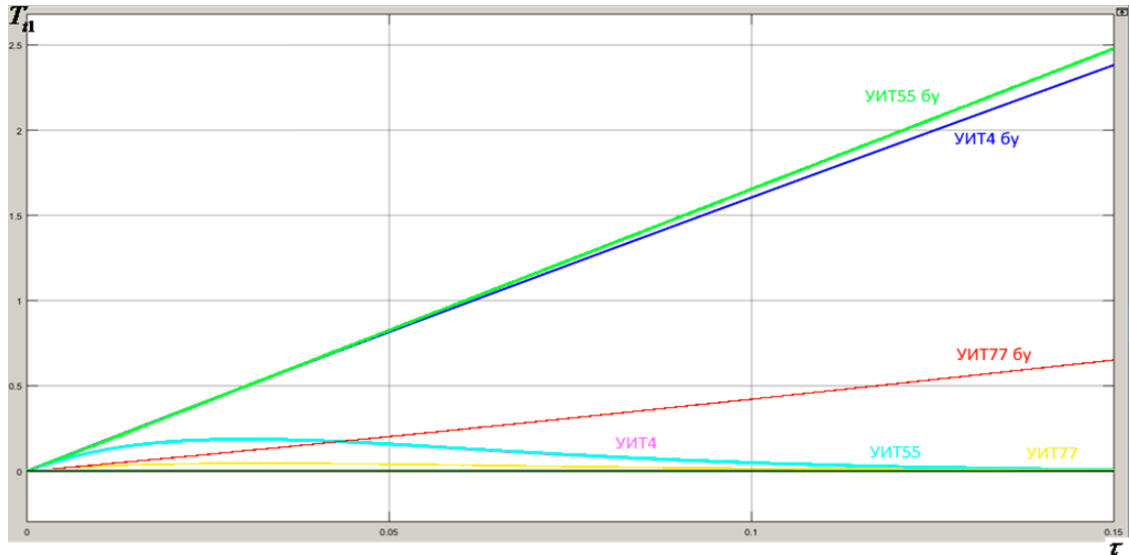


Рисунок 4.14 – Реакция САУ₁ с ПИ-регулятором в точке M_I на возмущения различных УИТ отдельно и суммарно (б.у. – без управления)

Для сравнения на рисунке 4.15 представлены результаты моделирования с ПИД-регулятором.

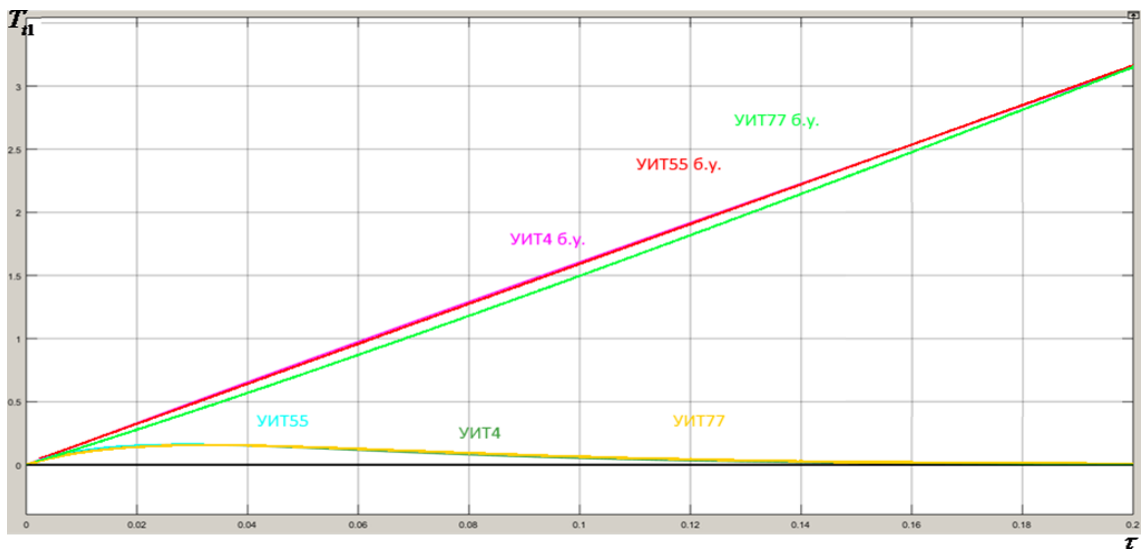


Рисунок 4.15 – Реакция САУ_i с ПИД-регулятором на возмущения различных УИТ (б.у. – без управления)

Очевидно, что добавление дифференциального канала приводит к некоторому улучшению качества регулирования, однако увеличивает чувствительность показателей качества к параметрам ОУ.

Переходный процесс в САУ с ПИ-регулятором по возмущению от различных удаленных от точки M_I УИТ представлен на рисунке 4.16.

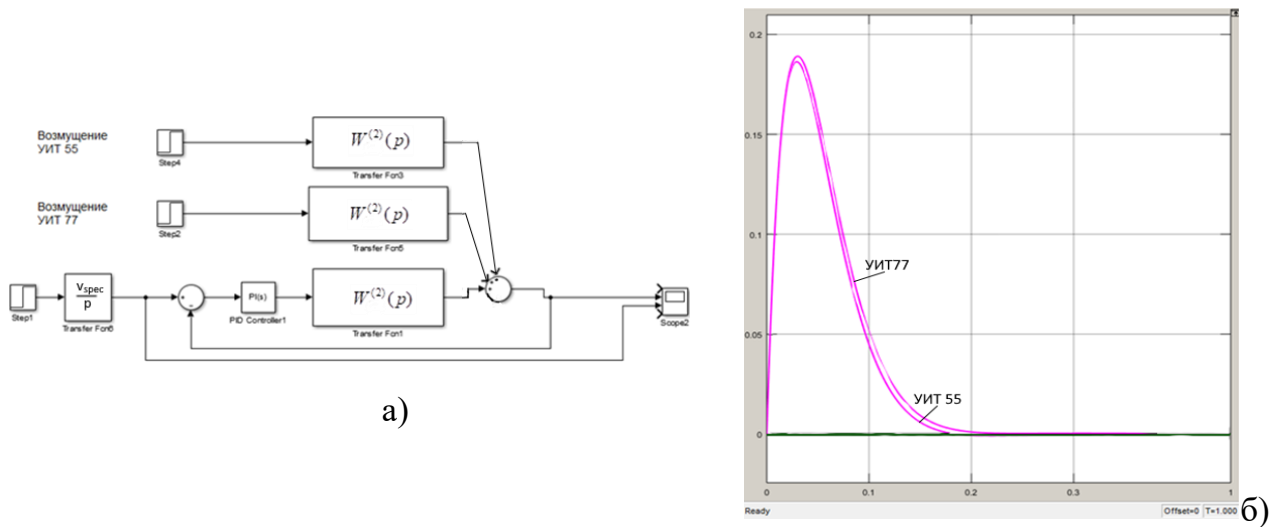


Рисунок 4.16 – Переходный процесс в САУ с ПИ-регулятором в точке M_I по возмущению а) схема моделирования б) график переходного процесса

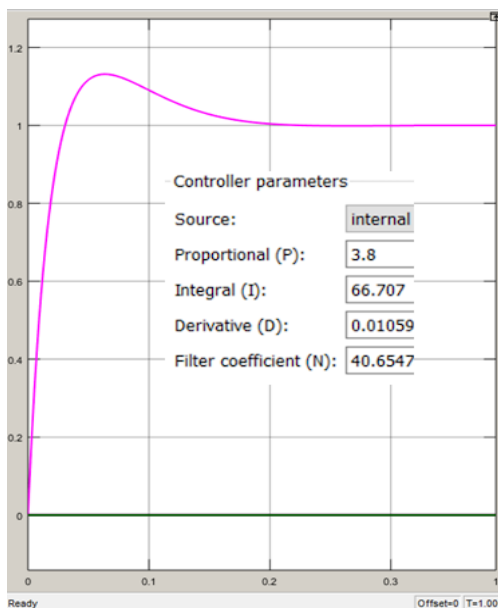


Рисунок 4.17 – Переходный процесс в САУ с ПИД регулятором

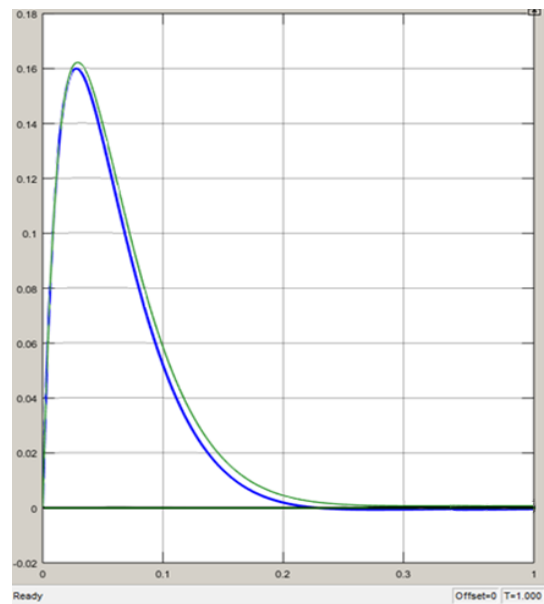


Рисунок 4.18 – Переходный процесс в САУ с ПИД регулятором в точке M_I по возмущению

Уточненное моделирование работы локальных САУ выполнен на конечно-элементной модели в программной среде «ANSYS» с помощью специально импортированного макроса (командного файла) – _Macros_solve.txt. Макрос написан доцентом А.Н. Давыдовым [33, 39] с использованием языка программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language). На рисунках 4.19-4.22 приведено распределение температур в НК в различные моменты времени без применения САУ.

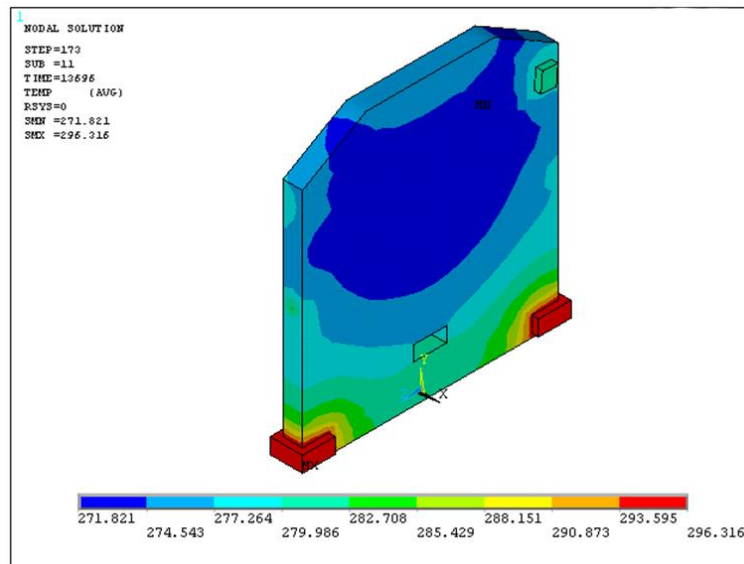


Рисунок 4.19 – Распределение температур в НК после 173 шага нагружения без регулирования. Цикл 3. Крышки закрыты. Время 13696 секунд

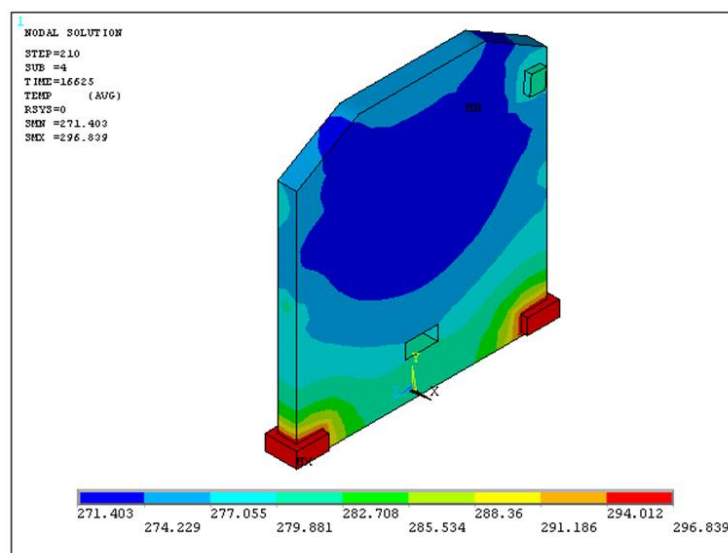


Рисунок 4.20 – Распределение температур в НК после 210 шага нагружения без регулирования. Цикл 3. Крышки открыты. Время 16625 секунд

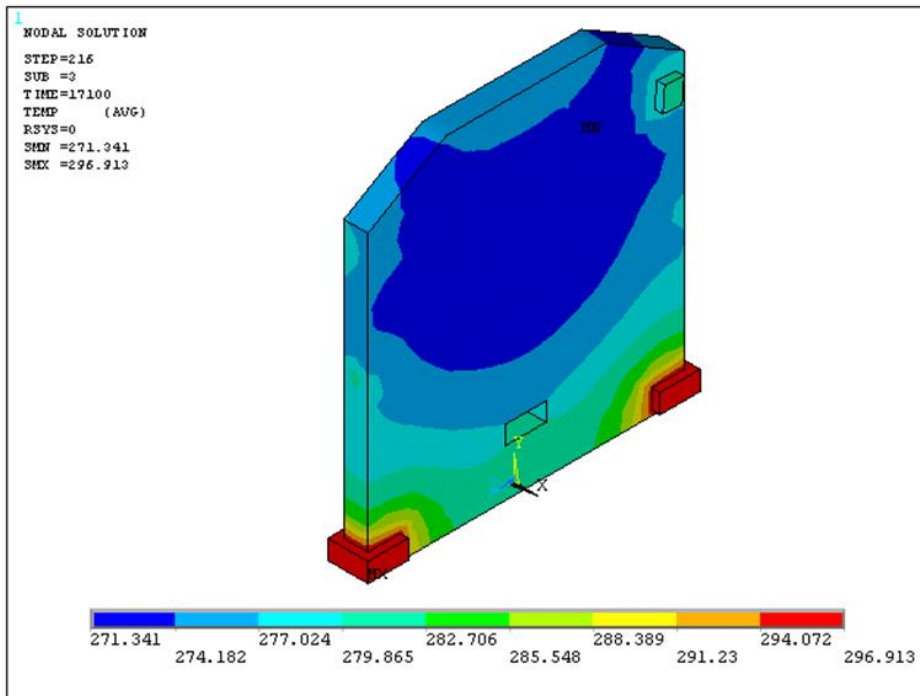


Рисунок 4.21 – Распределение температур в НК после 216 шага нагружения без регулирования. Цикл 3. Крышки открыты. Время 17100 секунд

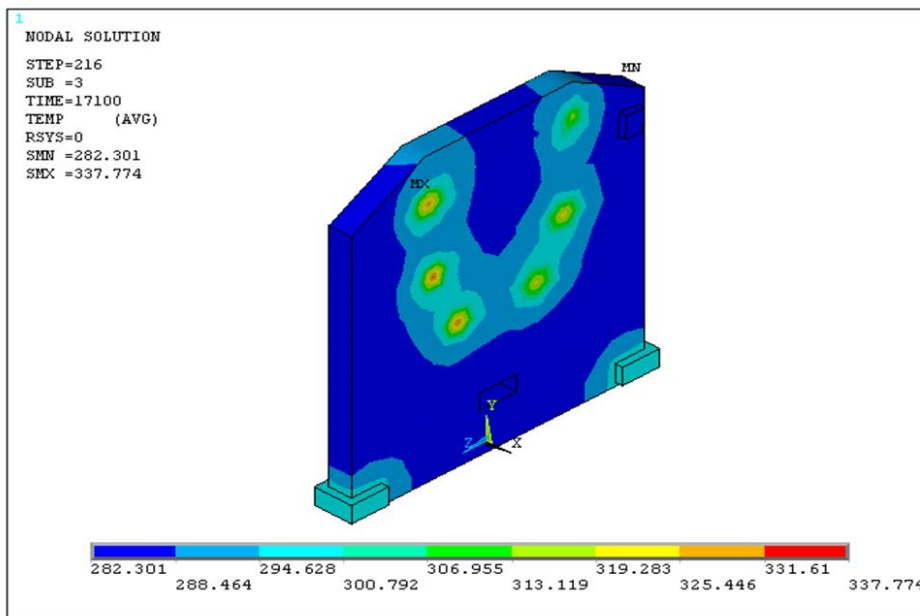


Рисунок 4.22 – Поле температур в момент времени $\tau^0 = 17100$ сек. с использованием простейшего алгоритма управления

Из рисунков видно, что использование разработанных САУ с простейшим алгоритмом управления (рис. 4.5) позволяет существенно повысить равномерность температурного поля в НК.

4.6 Выводы по четвертой главе

1. Разработана супервизорная структура подсистемы управления температурой НК ИИС КА, содержащая на локальных САУ температурой контрольных точек НК ИИС КА и алгоритм управления температурой контрольных точек.

2. Обоснована типовая структура ПИ и ПИД регуляторов для синтеза локальных САУ температурой контрольных точек НК ИИС и определены параметры настройки регуляторов с использованием стандартных средств «Matlab», обеспечивающие требуемые показатели качества САУ.

3. Линейный анализ САУ в программной среде «Matlab» показал ее высокую эффективность во всем исследуемом диапазоне использования.

4. Разработан простейший алгоритм автоматического управления температурой НК ИИС КА с включением в состав алгоритма локальных САУ температурой контрольных точек с переменной структурой.

5. Простейший алгоритм в ходе верификации на уточненной нелинейной конечно-элементной модели продемонстрировал достаточно высокую эффективность по требуемым показателям качества, однако нуждается в доработке для придания ему универсальности и комплектации служебными вспомогательными функциональными блоками.

5 АЛГОРИТМЫ ТЕРМОГРАДИЕНТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ В СОТР КА

5.1 Непрерывный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС КА

Предложенный в разделе 4.3 простейший алгоритм работы подсистемы управления, несмотря на очевидные преимущества, связанные прежде всего с простотой реализации и экономией бортовых вычислительных ресурсов, обладает существенными недостатками.

Прежде всего этот алгоритм не позволяет гибко реагировать на возмущения, компенсируя термоградиенты по всему объему НК. Кроме того, он не содержит служебных вспомогательных функций, обеспечивающих надежность эксплуатации элементов УИТ. С целью решения этих проблем предложены два варианта алгоритмов работы управляющей супервизорной программы (УП на рис 4.1) НК ИИС КА, определяющей заданную температуру $\theta_{spec}(\tau)$ для САУ термоградиентной стабилизации. Эти алгоритмы отличаются друг от друга ресурсоемкостью, эксплуатационными и потребительскими качествами, оба могут с успехом быть использованы в АО различного назначения.

В описании алгоритмов автоматической термоградиентной стабилизации (АТСТ) учтено, что контрольные точки снабжены датчиками температуры, номер которых совпадает с номерами контрольных точек.

Непрерывный алгоритм АТСТ НК ИИС КА использует пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон) регулирования распределения температуры по НК. Основными преимуществами алгоритма являются:

- непрерывное изменение мощности УИТ, что снижает риск резкого изменения температуры и образования термодформаций НК;

- повышение точности регулирования, за счет исключения статической ошибки, характерной для релейных алгоритмов;

- снижение времени регулирования, за счет наличия дифференциальной составляющей в законе регулирования, которая повышает скорость нарастания температуры.

Логика функционирования алгоритма основана на определении задающего воздействия $\theta_{spec}(\tau)$ для локальных САУ температурой НК ИИС КА, виртуальный регулятор которой реализует ПИД-закон регулирования (см. рис. 5.1). Задающее воздействие $\theta_{spec}(\tau)$ изменяется в зависимости от текущей максимальной температуры НК, в условиях накладываемых ограничений на максимальную и минимальную назначенную температуру НК.

Управляющее воздействие, формируемое регулятором, подается на УИТ дискретно в зависимости от значения мощности в текущий момент времени.

Входной информацией для работы алгоритма являются:

допустимый диапазон изменения температуры НК, от T_{\min} до T_{\max} ;

$K_j^{ПИД}, T_{uj}^{ПИД}, T_{dj}^{ПИД}$ - параметры настройки j -го ПИД-регулятора;

дискретность шага работы $i=1,2,\dots,n$, где n - общее число шагов работы алгоритма (шаги по нагрузке и/или по времени);

дискретность датчика и/или УИТ НК $j=1,2,\dots,N$, $N=64$ – максимальное число датчиков или УИТ НК;

мощность УИТ на первом шаге, обычно $P_{1,j}=0$.

Выходной информацией работы алгоритма являются:

признак работоспособности датчика;

признак работоспособности УИТ;

показания датчиков температуры $T_{i,j}$;

текущие значения подключенной мощности УИТ $P_{i,j}$.

5.1.1. Описание непрерывного алгоритма АТСТ НК ИИС КА

1. Встроенная диагностика

Встроенная диагностика построена одинаково для непрерывного и релейного АТСТ и включает в себя проверку исправности средств контроля температур (см. рис. 5.2). Проверка базируется на использовании цепи с ненулевым начальным значением токового сигнала (20мА), что позволяет идентифицировать ее обрыв. При обнаружении обрыва, соответствующая пара элементов (датчик температуры и УИТ) из опроса исключается, что обеспечивает сохранение работоспособности алгоритма. При

неисправности самой цепи измерительного узла, таким же образом, соответствующий управляющий канал исключается из процедуры опроса.

При устранении неисправности датчика, УИТ или управляющего канала, происходит автоматический возврат данных элементов в рабочий режим алгоритма.

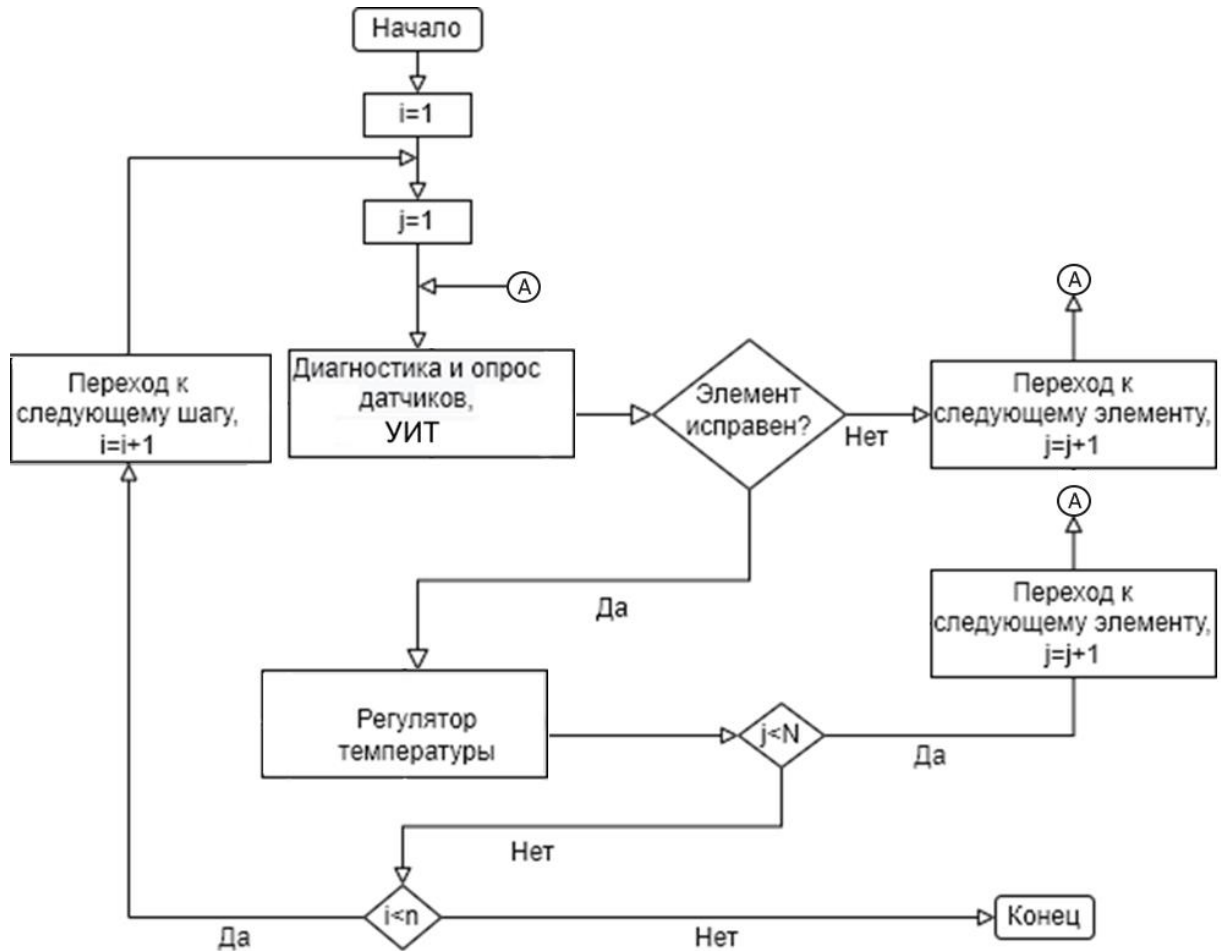


Рисунок 5.1 – Общая схема непрерывного АТСТ

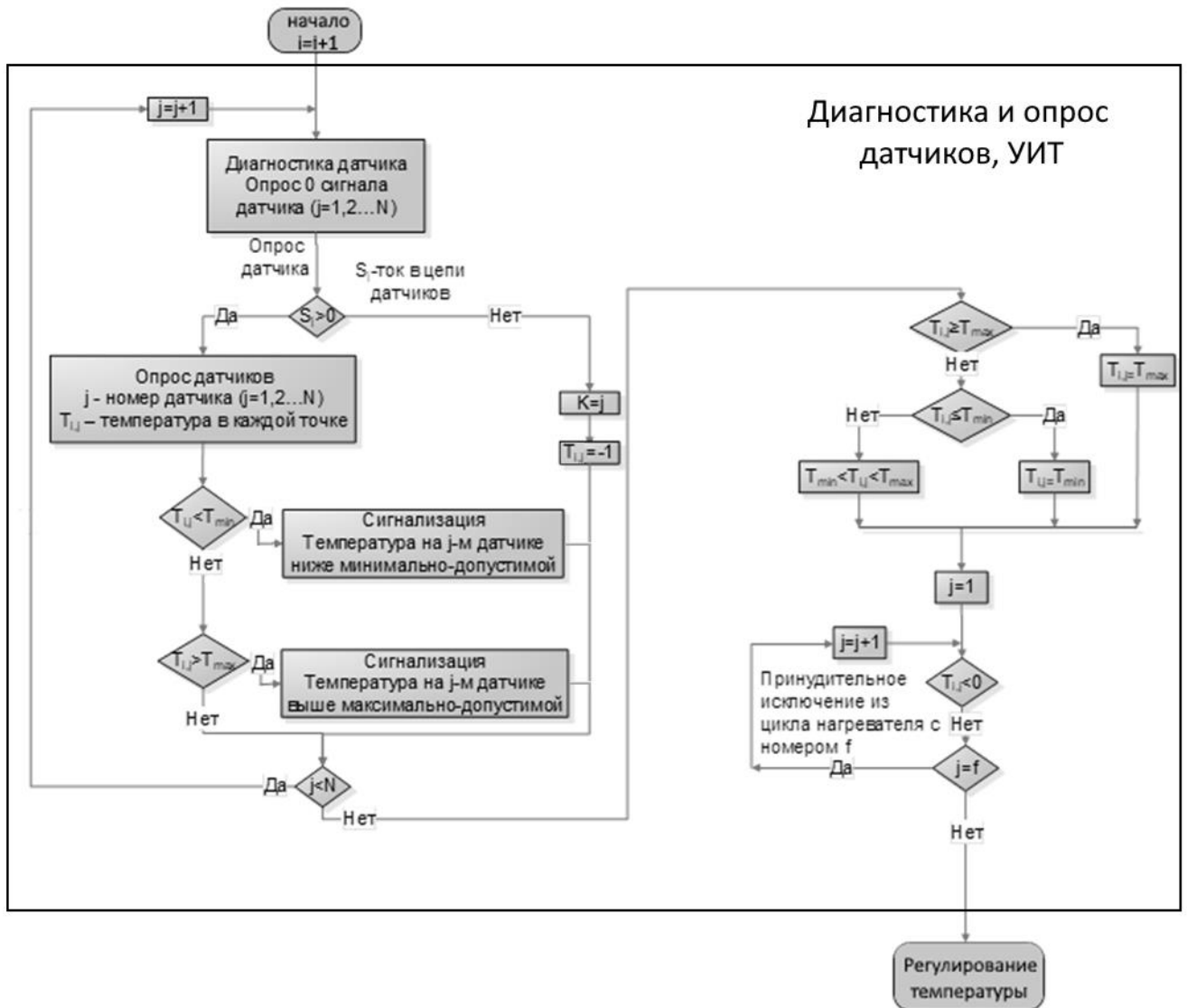


Рисунок 5.2 – Схема алгоритмического блока диагностики датчиков

2. Опрос датчиков и определение максимальной температуры НК на текущем шаге:

2.1 Информация о температуре j -го датчика $T_{i,j}$ записывается в память бортового микроконтроллера.

2.2 Проверка на выход из цикла опроса датчиков и переход к шагу 2.1:

2.2.1 Если в процессе опроса произошел переход к последнему датчику $j = N$, то осуществляется переход к шагу 2.3 алгоритма.

2.2.2 Если номер текущего датчика меньше числа общего количества датчиков $j < N$, то переход к следующему по номеру датчику $j = j + 1$ и осуществляется переход к шагу 2.1 алгоритма.

2.3 Поиск среди собранной информации о температуре T_i^{\max} с датчиков максимальной температуры НК.

3. На основании полученной информации, производится выбор определяющей температуры на данном шаге

3.1 Если $T_i^{\max} > T_{\max}$, то заданная регулятору ПИД температура на текущем шаге принимается равной максимальной назначенной температуре $T_{spec_i} = T_{\max}$;

3.2 Если $T_i^{\max} < T_{\min}$, то заданная регулятору ПИД температура на текущем шаге принимается равной минимальной назначенной температуре $T_{spec_i} = T_{\min}$;

3.3 Если $T_{\min} < T_i^{\max} < T_{\max}$, то заданная регулятору ПИД температура на текущем шаге принимается равной текущей максимальной температуре НК $T_{spec_i} = T_i^{\max}$.

4. Проверка на нахождение значения параметра в допустимом диапазоне изменения

4.1 Если текущая температура в датчике находится между граничных значений $T_{\min} \leq T_{i,j} \leq T_{\max}$, то мощность соответствующего УИТ на $i+1$ -ом шаге формируется по ПИД-закону в конечно-разностной форме:

$$P_{i+1,j} = K_j (T_{spec_i} - T_{i,j}) + \frac{1}{A \cdot T_{u_j}} \text{Integrator}_{i,j} (T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) + A \cdot T_{\theta_j} \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\tau_i - \tau_{i-1}} \quad (5.1)$$

$$\text{Integrator}_{i,j} (T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = \sum_{i=1}^n [(T_{spec_i} - T_{i,j}) (\tau_i - \tau_{i-1})] \quad (5.2)$$

где t_i - текущее время работы алгоритма, A - масштабный коэффициент, который устраняет негативное влияние на работу алгоритма большого шага дискретизации по времени (установка необходима, только если время опроса датчиков и определение управляющих воздействий превышает 5 секунд), значение коэффициента выбирается в зависимости от шага дискретизации по времени, $\text{Integrator}_{i,j} (T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1})$ - интегратор.

4.2 Если текущая температура в датчике $T_{i,j} < T_{\min}$, то мощность соответствующего УИТ на $i+1$ -ом шаге устанавливается равной $P_{i+1,j} = P_{\max}$, и интегратор (4.4) в (4.5) принудительно устанавливается в состояние $\text{Integrator}_{i+1,j} (T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = 0$.

4.3 Если текущая температура в датчике $T_{i,j} > T_{\max}$, то мощность соответствующего УИТ на $i+1$ -ом шаге устанавливается равным $P_{i+1,j} = 0$ и интегратор (4.5) в (4.4) принудительно устанавливается в состоянии $Integrator_{i+1,j}(T_{spec_i}, T_{i,j}, \tau_i, \tau_{i-1}) = 0$;

4.4 Управляющее воздействие - изменение во времени мощности УИТ ограничено максимальным и минимальным значением, и изменяется дискретно, например имеет 8 возможных уровней (см. рис. 5.3).

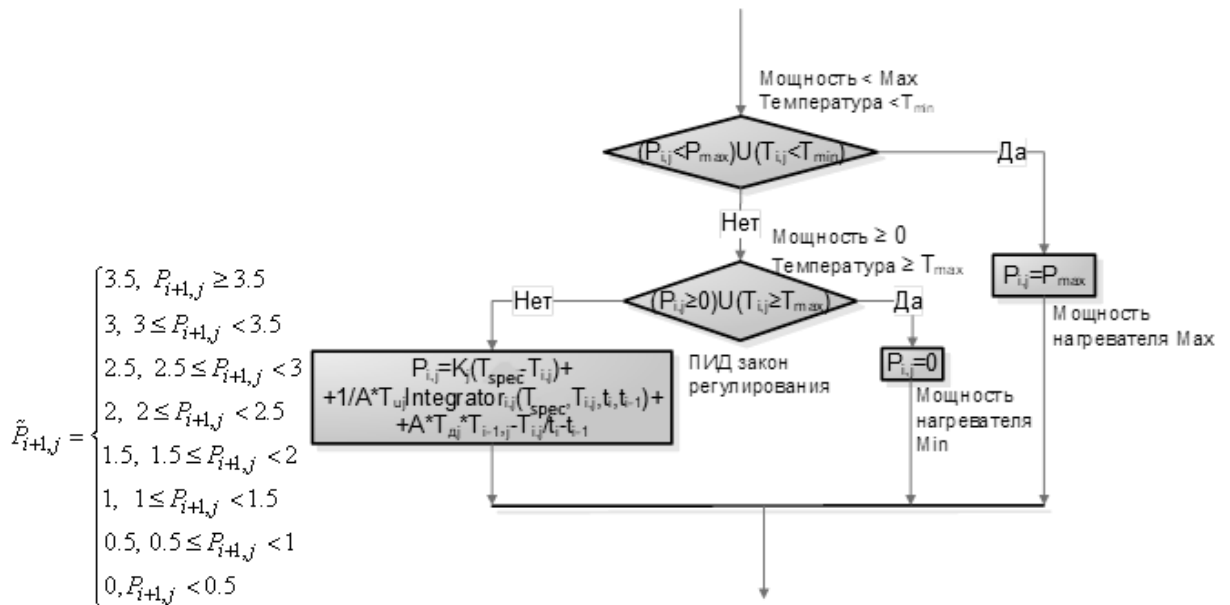


Рисунок 5.3 – Схема блока ПИД -управления непрерывного АТСТ

5. Проверка на достижение предельного числа опрашиваемых датчиков

5.1 Если $j = N$, то осуществляется переход к 7-му шагу алгоритма.

5.2 Если $j < N$, то осуществляется переход к 6-му шагу алгоритма.

6. Переход к следующему УИТ $j = j + 1$. Переход к 4-му шагу.

7. Проверка на выход из алгоритма

7.1 Если $i < n$, то осуществляется переход к 1-му шагу работы алгоритма $i = i + 1$

7.2 Если $i = n$, то осуществляется выход из алгоритма.

Таким образом, непрерывный алгоритм САУ температурой НК ИИС КА достаточно прост в реализации и требует достаточно малого, хотя и большего чем релейный алгоритм вычислительного ресурса, кроме того, позволяет непрерывно регулировать мощность УИТ, уменьшает время и повышает точность регулирования. К недостаткам непрерывного алгоритма относятся отсутствие непосредственного учета

средней температуры по площади каркаса и отсутствие специального блока локального регулирования перепада температуры по толщине НК, который регулирует этот перепад в рамках общей температурной стабилизации всей НК.

5.2 Релейный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС КА

Релейный алгоритм НК ИИС КА реализует релейный многопозиционный закон регулирования распределением температуры по НК. Управление осуществляется путем последовательного релейного изменения мощности $P_i(\tau), P_{iu}(\tau)$ УИТ.

Виртуальный регулятор температурного режима НК состоит из двух последовательных модулей.

Первый модуль определяет находится ли температура регулируемой точки в назначенном диапазоне и формирует необходимые для попадания в этот диапазон уровни подключаемой мощности УИТ.

При попадании температуры НК в заданный диапазон, отработка второго модуля контролирует сохранение температурного перепада для рассматриваемой симметричной пары датчиков в назначенном диапазоне, формирует необходимые для этого уровни подключаемой мощности УИТ.

По условиям функционирования алгоритма мощность УИТ $P_i(\tau)$ начнет изменяться, если перепад температуры по толщине НК в противоположащих датчиках будет больше заданной величины $T_{spec} = T_{рег}$ или если температура, контролируемая одним из датчиков, выйдет за назначенный интервал $[T_{int_min}, T_{int_max}]$. Релейный алгоритм обеспечивает пониженный суммарный расход энергии УИТ на стабилизацию термоградиента НК.

Вводной информацией для работы алгоритма являются:

допустимый диапазон изменения температуры НК, от T_{min} до T_{max} ;

величина предельно допустимого перепада температур $D = T_{рег}$ между рабочими поверхностями НК;

дискретизация шага работы $i = 1, 2, \dots, n$, где n - общее число шагов работы алгоритма (шаги по нагрузке и/или по времени);

дискретизация датчика и/или УИТ с одной стороны НК $j=1,2,\dots,N_t$, где $N_t=32$ – максимальное число датчиков или УИТ с одной стороны НК;

уровни мощности УИТ $k_{i,j}=1,2,\dots,8$;

уровень мощности на первом шаге $k_{1,j}=1$, обычно $P_{1,j}=0$.

Выходной информацией работы алгоритма являются:

признак работоспособности датчика;

признак работоспособности УИТ;

показания датчиков температуры $T_{i,j}$;

текущие значения подключенной мощности УИТ $P_{i,j}$.

5.2.1. Описание релейного алгоритма АТСТ НК ИИС КА

1. Встроенная диагностика

Встроенная диагностика включает в себя проверку исправности средств контроля температур и выполнена аналогично непрерывному алгоритму.

2. Опрос датчика

Информация о температуре j -го датчика $T_{i,j}$ записывается в память микроконтроллера.

3. Проверка на нахождение значения параметра в допустимом диапазоне изменения

3.1 Производится сравнение измеренной j -ым датчиком температуры в j -ом узле с установленной допустимой минимальной температурой T_{\min} , если значение меньше $T_{i,j} < T_{\min}$ заданного T_{\min} , то уровень мощности УИТ $P_j(\tau)$ j -го узла увеличивается на 1 ступень ($k_{i+1,j} = k_{i,j} + 1$), т.е. мощность j -го УИТ на следующем $(i+1)$ -ом шаге работы станет равным $P_{i+1,j} = 0.5 \cdot P_{\max} \cdot (k_{i+1,j} + 1)$. При этом проверяется не превышает ли уровень мощности УИТ максимально возможный, если $k_{i+1,j} > 8$, то уровень мощности УИТ $P_j(\tau)$ устанавливается равным установленному для максимального 8-го диапазона ($k_{i+1,j} = 8$).

Аналогично алгоритм проходят датчики на противоположной стороне НК (в данном случае $j+32$).

3.2 Производится сравнение измеренной j -ым датчиком температуры в j -ом узле с установленной допустимой с максимальной температурой, и если ее значение выше

$T_{i,j} > T_{\max}$ заданного T_{\max} , то уровень мощности УИТ j -го узла уменьшается на 1 ступень ($k_{i+1,j} = k_{i,j} - 1$), т.е. мощность j -го УИТ на следующем $(i+1)$ -ом шаге работы станет равным $P_{i+1,j} = 0.5 \cdot P_{\max} \cdot (k_{i+1,j} - 1)$. При этом проверяется, не превышает ли уровень мощности УИТ минимально возможный, если $k_{i+1,j} < 1$, то уровень мощности УИТ устанавливается равным минимально возможному ($k_{i+1,j} = 1$).

Аналогично происходит опрос датчиков на противоположной стороне НК (в рассматриваемом случае $j+32$).

3.3 Если текущее значение температуры в датчике находится между минимально и максимально допустимой $T_{\min} \leq T_{i,j} \leq T_{\max}$, то уровень мощности соответствующего УИТ на следующем $(i+1)$ -ом шаге работы не изменяется, т.е.

$$k_{i+1,j} = k_{i,j}, P_{i+1,j} = P_{i,j}.$$

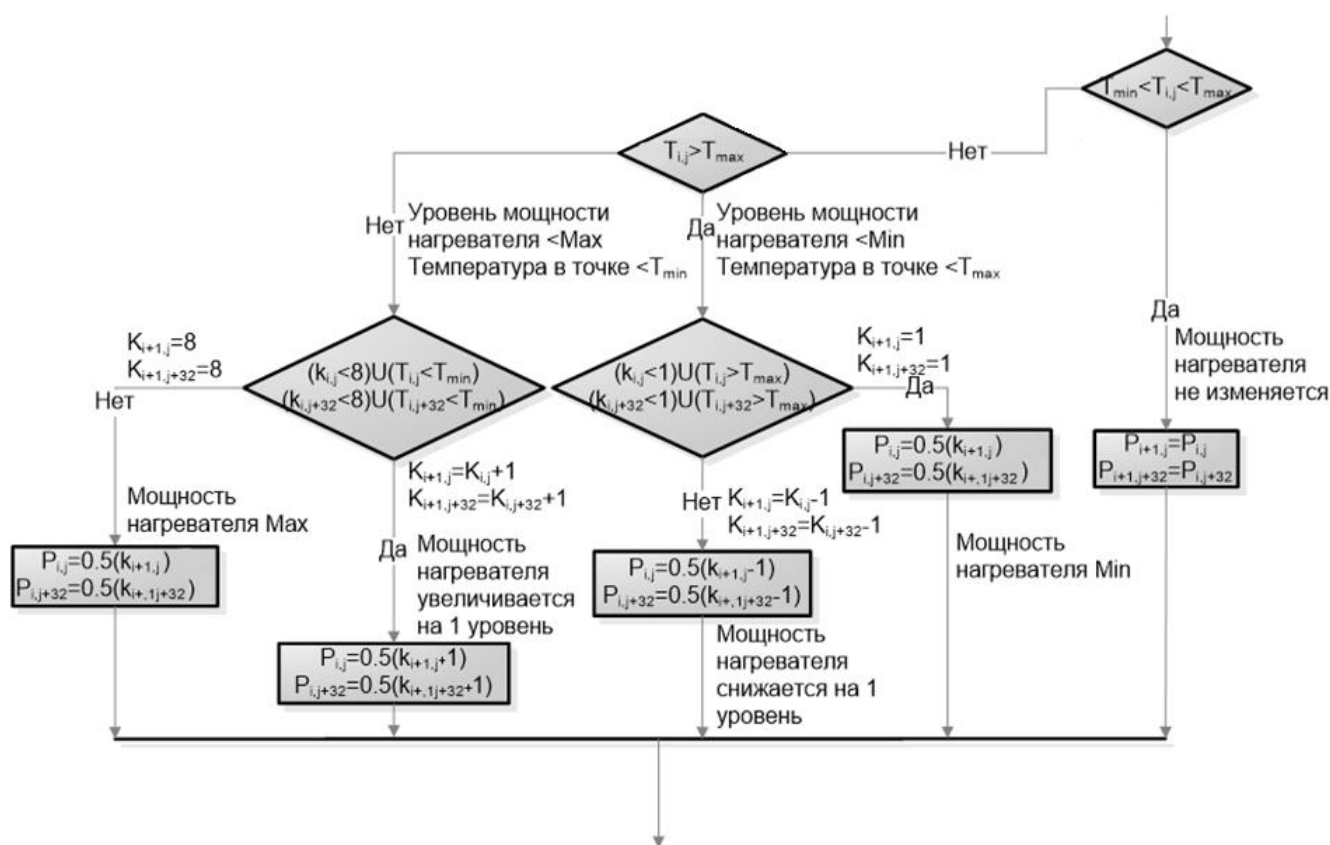


Рисунок 5.4 – Блок 1 температуры релейного АТСТ НК

4. Определение величины перепада температур по толщине НК

Производится вычисление разницы показаний температур в датчиках, расположенных с двух сторон НК (см. рисунок 2.1) напротив друг друга $dT_i = T_{i,j} - T_{i,j+32}$, для определения перепада температур по толщине НК.

5. Проверка на нахождение значения перепада температур в назначенном диапазоне и формирование управляющих воздействий

5.1 После определения значения перепада температур, происходит проверка абсолютной величины перепада $|dT_i|$ на вхождение в допустимый заданный диапазон D . Если $|dT_i| \leq D$ то управляющих воздействий не требуется, мощность УИТ остается на прежнем уровне, т.е. $k_{i+1,j} = k_{i,j}$, $P_{i+1,j} = P_{i,j}$, $k_{i+1,j+32} = k_{i,j+32}$, $P_{i+1,j+32} = P_{i,j+32}$.

5.2 Если $|dT_i| > D$, то в зависимости от знака величины dT_i устанавливаются следующие законы изменения мощности УИТ:

5.2.1 Если $dT_i > 0$ (т.е. $T_{i,j} > T_{i,j+32}$), то возможны несколько вариантов:

5.2.1.1. Если $k_{i,j} \geq k_{i,j+32}$, $k_{i,j} > 1$ уровень мощности УИТ минимально возможный, если $k_{i+1,j} < 1$, то уровень мощности УИТ устанавливается равным $k_{i+1,j} = 1$, $P_{i+1,j} = 0.5 \cdot P_{\max} \cdot (k_{i+1,j} - 1)$, а на стороне НК, где температура меньше, мощность УИТ остается на прежнем уровне $k_{i+1,j} = k_{i,j}$, $P_{i+1,j} = P_{i,j}$.

5.2.2.2. Если $k_{i,j} \leq k_{i,j+32}$ или $k_{i,j+32} = 1$, то со стороны НК, где температура больше, мощность УИТ остается на минимальном уровне без изменений $k_{i+1,j+32} = k_{i,j+32}$, $P_{i+1,j+32} = P_{i,j+32}$, а мощность УИТ на противоположной стороне повышается на 1 уровень:

$$k_{i+1,j} = k_{i,j} + 1,$$

при этом проверяется, не превышает ли уровень мощности УИТ максимально возможный, если $k_{i+1,j} > 8$, то уровень мощности УИТ устанавливается равным $k_{i+1,j} = 8$.

$$P_{i+1,j} = 0.5 \cdot P_{\max} \cdot (k_{i+1,j} - 1).$$

5.2.3. Если $dT_i = 0$, то изменения не производятся, т.е.

$$k_{i+1,j} = k_{i,j}, P_{i+1,j} = P_{i,j}, k_{i+1,j+32} = k_{i,j+32}, P_{i+1,j+32} = P_{i,j+32}.$$

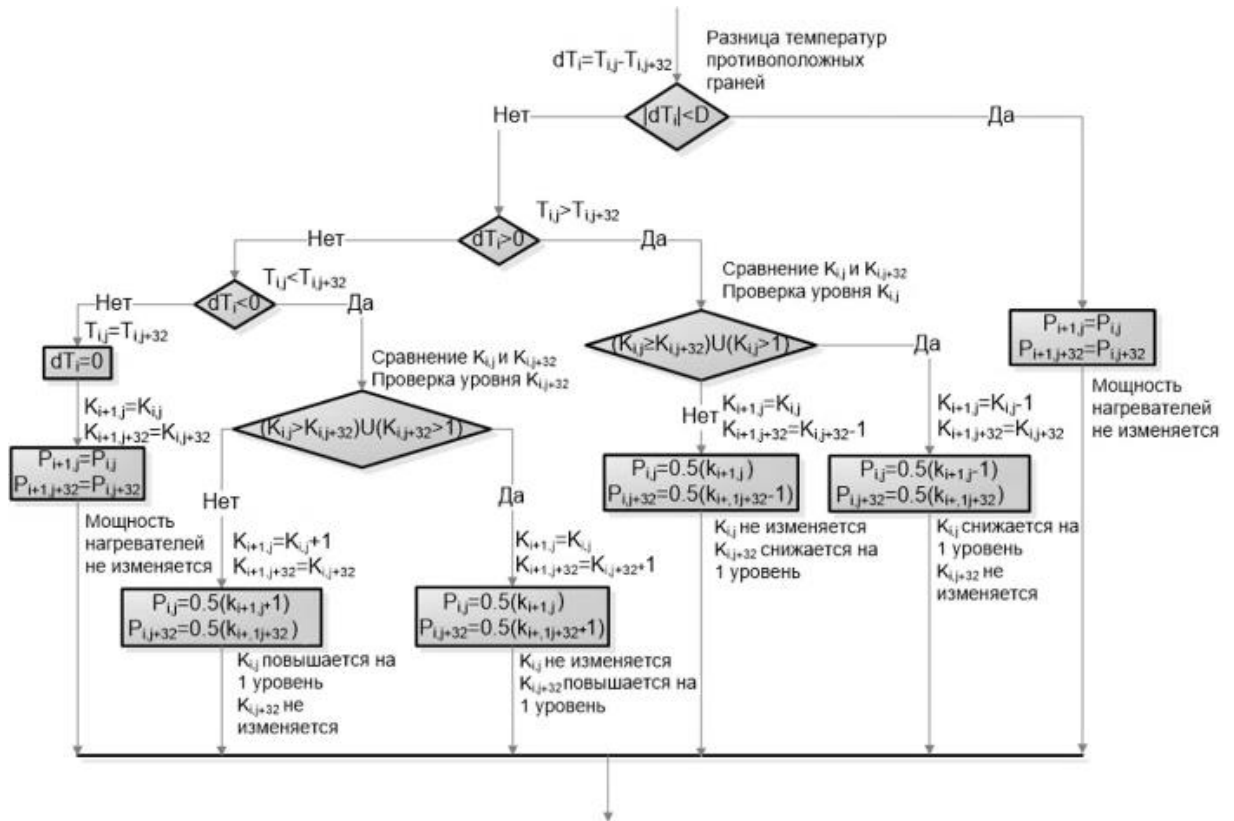


Рисунок 5.5 – Блок 2 термоперепада релейного АТСТ

6. Проверка на достижение предельного числа опрашиваемых датчиков

6.1 Если $j = N$, то осуществляется переход к 8-му шагу алгоритма.

6.2 Если $j < N$, то осуществляется переход к 7-му шагу алгоритма

7. Переход к следующему датчику и соответствующему УИТ $j = j + 1$

Переход к 1-му шагу, диагностика следующей пары датчик-УИТ.

8. Проверка на выход из алгоритма

8.1 Если $i < n$, то осуществляется переход к 1-му шагу работы алгоритма $i = i + 1$

8.2 Если $i = n$, то осуществляется выход из алгоритма.

Таким образом, релейный алгоритм НК ИИС КА достаточно прост в реализации, обладает малым информационным ресурсом памяти, обеспечивает суммарные малые затраты электроэнергии на нагрев элементов температурного регулирования. К недостаткам данного алгоритма относятся большое время и невысокая точность регулирования.

Чтобы снизить достаточно большое время регулирования релейного алгоритма, которое вызвано тем, что за один рабочий цикл мощность каждого элемента температурного регулирования изменяется только один раз на каждом шаге работы

алгоритма определяется и запоминается величина разности $\Delta T_j = \begin{cases} T_{ij} - T_{\max} \\ T_{ij} - T_{\min} \end{cases}$ между максимальной T_{\max} или минимальной T_{\min} температурой и текущей $T_{i,j}, T_{i,j+32}$ (см. шаги 3.1 и 3.2).

Если, например, $\Delta T_i \geq 2K$, то уровень мощности УИТ на следующем шаге устанавливается равным $k_{i+1,j} = k_{i,j} \pm 2$, где знак определяется в зависимости от значений текущей температуры ($T_{i,j} < T_{\min}$ или $T_{i,j} > T_{\max}$ соответственно). т.е. фактически вносятся изменения в шаги 3.1 и 3.2 работы релейного алгоритма.

5.3 Имитационное численное моделирование управляемых температурных режимов НК

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, которые позволяют провести сравнительный анализ в трех вариантах: без регулирования, с релейным АТСТ и с непрерывным АТСТ. При этом настройки локальных САУ использованы в соответствии с результатами раздела 4.

Численная модель объекта в конечно-элементной форме подробно исследована в работах [33, 40, 62]. Здесь сосредоточимся на результатах использования этой модели в составе предложенных алгоритмов.

Для уточнённого конечно-элементного моделирования НК ИИС КА были выделены два основных режима: штатного и нештатного режима работы. Нештатными считаются условия, в которых в результате сбоя, механизм закрытия люка не сработал должным образом, и створка осталась в открытом положении. Каждый из рассмотренных расчётов включает семь циклов нагружения, каждый продолжительностью $\tau_{ц}$. Первые три цикла нагружения – штатный режим без регулирования. Расчёт этих циклов нагружения позволяет нивелировать влияние начального распределения температур – оно принималось однородным с температурой $\theta_0 = 0$ ($T_0 = 0$). Расчёт последующих двух циклов нагружения соответствовал одному из условий работы без регулирования, а расчёт следующих двух циклов нагружения выполнялся для тех же условий, но с регулированием по одному из рассматриваемых алгоритмов.

5.3.1 Штатный режим 1

На рисунках 5.6-5.20 приведены результаты численного моделирования управляемого и неуправляемого температурного режима НК для штатного режима с открытием люков. Первые пять циклов нагружения продолжительностью $5\tau_{ц}$ - результаты моделирования температурного поля НК без регулирования. Шестой и седьмой цикл нагружения продолжительностью $2\tau_{ц}$ на рисунках 5.6-5.20 повторяют режим четвертого и пятого цикла нагружения, но с использованием САУ, функционирующей по непрерывному алгоритму (а) и САУ, функционирующей по релейному алгоритму (б).

На рисунке 5.6 приведена относительная температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме функционирования УИТ НК ИИС КА. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом УИТ (а) уменьшает среднюю амплитуду колебаний относительной температуры в зоне датчиков №1, №33 на 0,15 ед. (0.45 K) по сравнению с режимом моделирования без регулирования (4,5 цикл нагружения без регулирования) и на 1,04 ед. (3.05 K) по сравнению с режимом моделирования САУ с релейным алгоритмом УИТ (б). Существенное отклонение в конце управляемого периода объясняется глубиной возмущения, превышающей энергетические возможности УИТ (см. рис. 5.8).

Для оценки влияния работы люков на температуру НК и работы алгоритмов при открытии люков приведены рисунки 5.7-5.9.

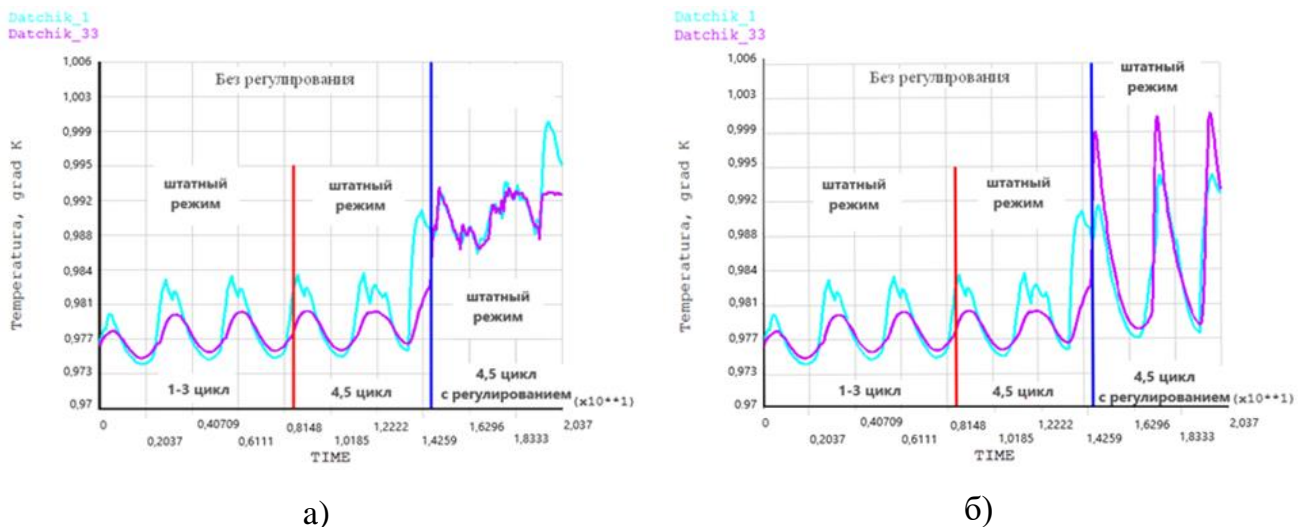
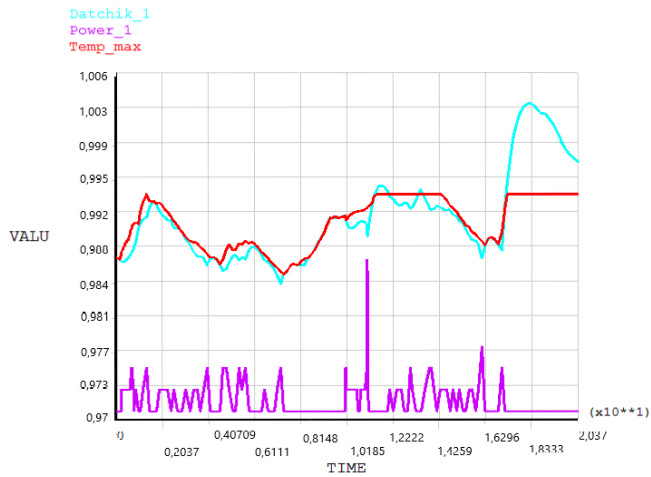


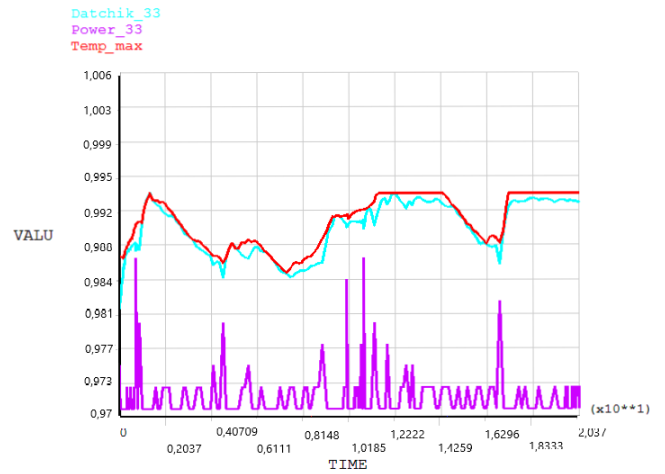
Рисунок 5.6 – Температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

На рисунке 5.7 приведены относительные значения используемой мощности элементов температурного регулирования и соответствующие им температуры в зоне

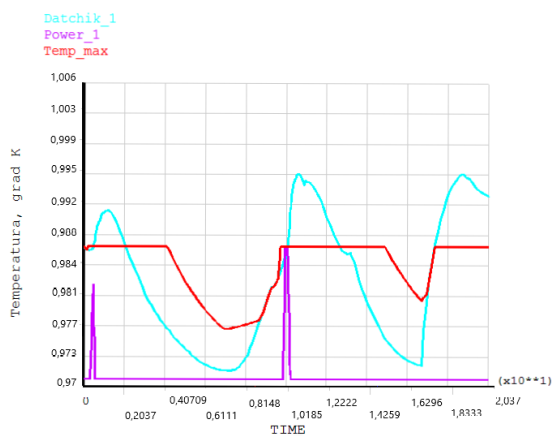
датчиков №1, №33, а также текущая максимальная температура НК. Из рисунка 5.7 видно, что за период, когда один из люков открыт (от 5τ до 6τ), текущая максимальная температура НК при непрерывном алгоритме возрастает на 0,5 ед. (1,5 К), под воздействием действующих в этот момент внешних тепловых потоков и, как следствие, увеличивающих максимальную температуру НК в зонах близлежащих датчиков. При этом под действием алгоритма происходит быстрое и непрерывное повышение текущей температуры в зоне датчика №1 на 0,44 ед. (1,3 К), а в зоне датчика №33 на 0,5 ед. (1,5 К), за счет дифференциальной и интегральной составляющей ПИД-регулятора соответственно. При релейном алгоритме за этот период текущая максимальная температура остается на пороговом уровне в 98,8 ед. (296,5 К), что объясняется условием функционирования алгоритма, а текущая температура в зоне датчика №1 увеличивается на 0,3 ед. (1 К), в зоне датчика №33 увеличивается на 1,1 ед. (3,3 К). Релейный алгоритм: в момент открытия одного из люков, УИТ в зоне датчика №33 работает на максимальном уровне мощности УИТ в течение 80 сек., что влечет за собой локальный перегрев в этой зоне, и, как следствие, увеличение температурного перепада по толщине НК свыше заданного максимального значения на 0,44 ед. (1,3 К), что, в свою очередь, приводит к включению другой ветви релейного алгоритма, которая сначала постепенно за 6 временных шагов моделирования отключает УИТ в зоне датчика №33, а затем начинает увеличивать мощность противоположащего УИТ в зоне датчика №1 до тех пор, пока величина температурного перепада не окажется меньше заданного максимального значения. Только после этого заработает первая ветвь релейного алгоритма, которая сравнит текущую температуру в зонах датчиков с текущей заданной максимальной и отключит соответствующие УИТ.



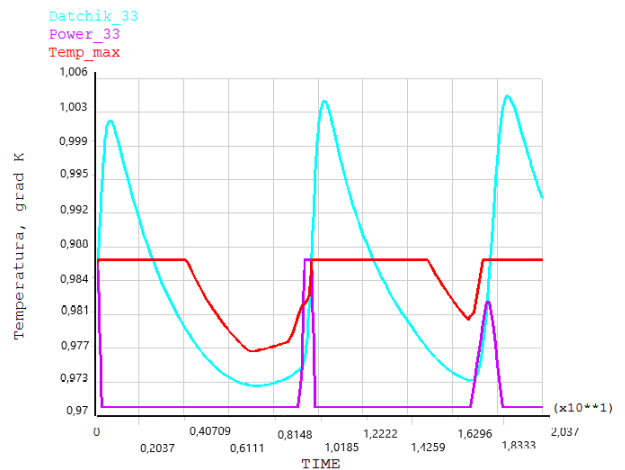
а)



б)



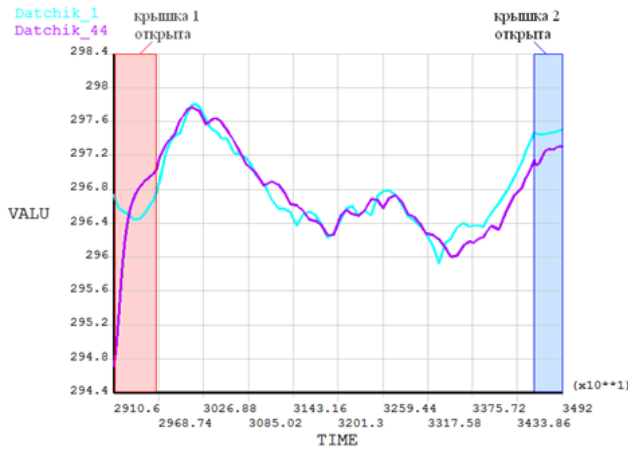
в)



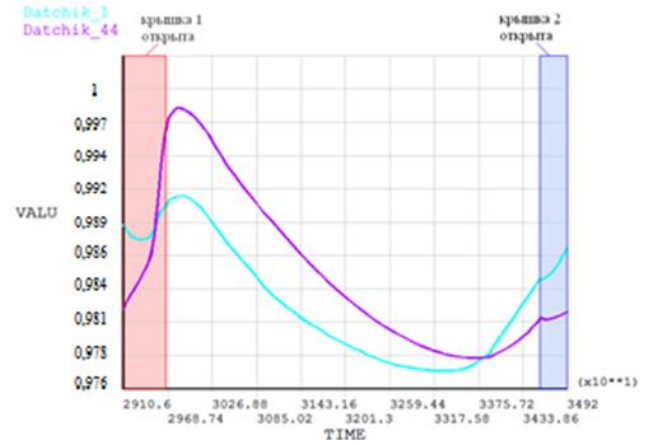
г)

Рисунок 5.7 – Температура в зоне датчиков №1 (а, в) и №33 (б, г), мощности УИТ (Power_1, Power_33) и текущей заданной максимальной температуры НК (Temp_max) при непрерывном (а, б) и релейном (в, г) АТСТ НК ИИС КА

На рисунке 5.8 видно, что при непрерывном алгоритме (а) практически отсутствуют пиковые перегревы зон датчиков №1 и №44 в моменты открытия люков, что объясняется работой соответствующих регуляторов (рисунки 5.7 а и 5.7 в), тогда как при релейном алгоритме (б), после закрытия люка №1 температура в зоне датчика №44 увеличивается на 1 ед. (3 К) от заданной.



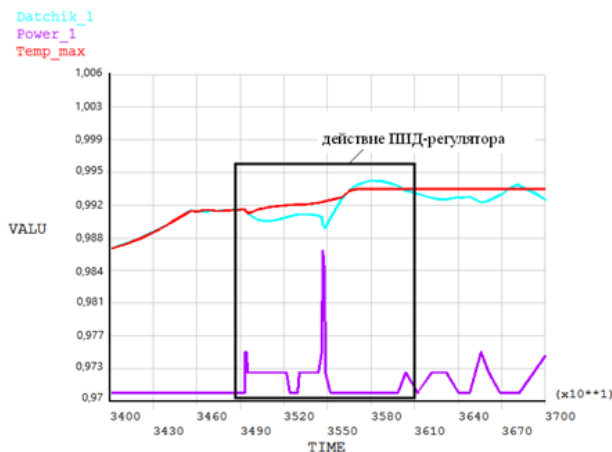
а)



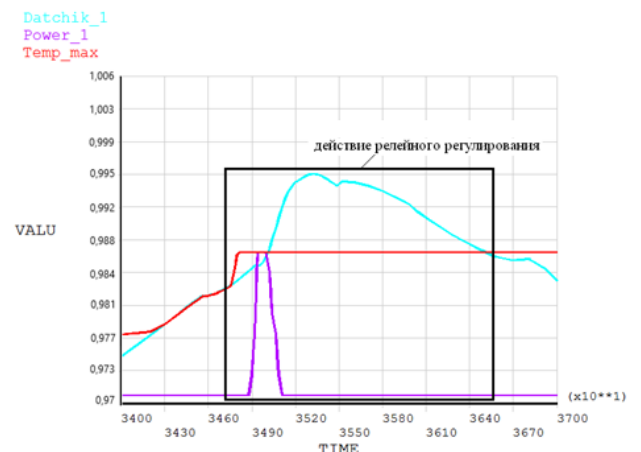
б)

Рисунок 5.8 – Температура в зоне датчиков №1 и №44 на шестом цикле в штатном режиме при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

Рисунок 5.9 иллюстрирует влияние ПИД-регулятора на характер изменения температуры в зоне датчика №1 при непрерывном алгоритме (а) и влияние релейного регулирования при релейном алгоритме (б). Результаты сравнения показывают, что ПИД-регулятор, за счет дифференцирующей составляющей, быстрее реагирует на отклонение температуры от текущего заданного максимального значения 17 сек. против 120 сек. у релейного регулирования. За счет этого величина максимального отклонения текущей температуры от заданного максимального значения для непрерывного алгоритма составляет 6.1 %. против 54.3 % - для релейного.



а)



б)

Рисунок 5.9 – Температура в зоне датчика №1, мощность УИТ (Power_1) и текущей заданной максимальной температуры НК (Temp_max) при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

На рисунке 5.10 приведены температурные перепады по толщине НК в зоне противоположащих датчиков. Из рисунка видно, что максимальный температурный перепад в зоне датчиков №1-33 в режиме моделирования без регулирования в конце 5 цикла нагружения достигает значения 1,09 ед. (3,2 К), при этом САУ с непрерывным алгоритмом (а) обеспечивает уменьшение максимального температурного перепада до 0,75 ед. (2,2 К), а САУ с релейным алгоритмом (б) увеличивает максимальный температурный перепад до значения в 1,16 ед. (3,4 К). Очевидно, что непрерывный алгоритм обеспечивает средний перепад температуры в зоне НК между 1 и 33 датчиком не более чем 0,27 ед. (0,8 К), в отличие от релейного алгоритма, обеспечивающего средний перепад в 0,51 ед. (1,5 К). При этом текущая заданная максимальная температура для непрерывного ПИД-регулятора не превышает 1,7 ед. (3,4 К) от заданного значения, поэтому регулятор не имеет возможности свести к минимуму перепад температуры в конце 5 цикла нагружения, т.к. нагрев внешними тепловыми потоками в зоне датчика №1 слишком велик, а противоположащий регулятор выходит на предельно допустимую температуру в зоне датчика №33. Поэтому в этой области непрерывный алгоритм отключает УИТ (рисунок 5.7 а, в).

Аналогичные результаты приведены на рисунках 5.11, 5.12 для зон датчиков №12, №44.

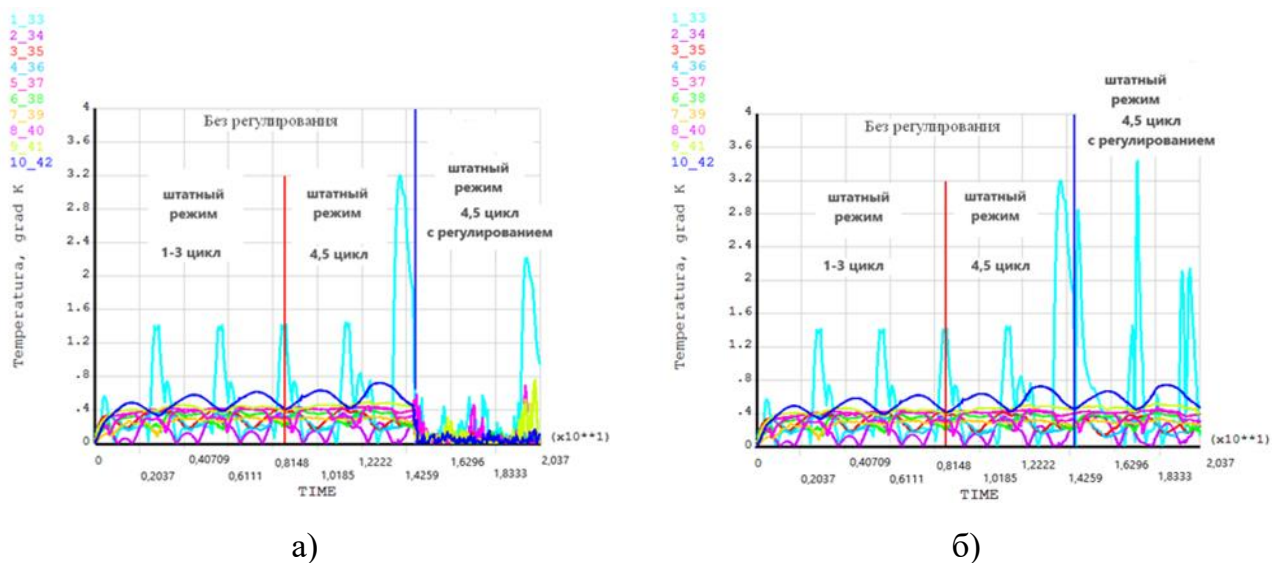


Рисунок 5.10 – Температурный перепад по толщине НК в зоне противоположащих датчиков при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК

На рисунке 5.11 приведена температура НК в зоне датчиков №12, №44 при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом (а) уменьшает амплитуду колебаний температуры в зоне датчиков №12, №44 на 0,31 ед. (0,91 К) относительно режима моделирования без регулирования (4,5 цикл нагружения без регулирования) и на 0,45 ед. (1,32 К) относительно режима моделирования САУ с релейным алгоритмом (б). Это в свою очередь снижает уровень термдеформации.

Для сравнения режимов работы САУ на рисунке 5.12 приведены относительные в не оцифрованном масштабе значения используемой мощности элементов температурного регулирования и соответствующие им температуры в зоне датчиков №12, №44, а также текущая заданная максимальная температура НК.

Из рисунка 5.11 видно, что на 5 цикле с регулированием после закрытия люка №1 (с момента времени t_0) происходит увеличение температуры в зоне №44 датчика как при непрерывном алгоритме (а) до 1,3 ед. (3,9 К), так и при релейном (б) до 1,06 ед. (3,2). При этом соответствующий УИТ, в зоне датчика №44 как при непрерывном алгоритме (см. рисунок 5.12 в), так и при релейном (см. рисунок 5.12 г) в этот момент выключен. Это объясняется тем, что, нагрев внешними тепловыми потоками в зоне датчика слишком велик, а противолежащий регулятор выходит на предельно допустимую температуру в зоне датчика №12. Таким образом, для стабилизации температурного перепада по толщине НК в данных зонах необходимо использовать контуры охлаждения.

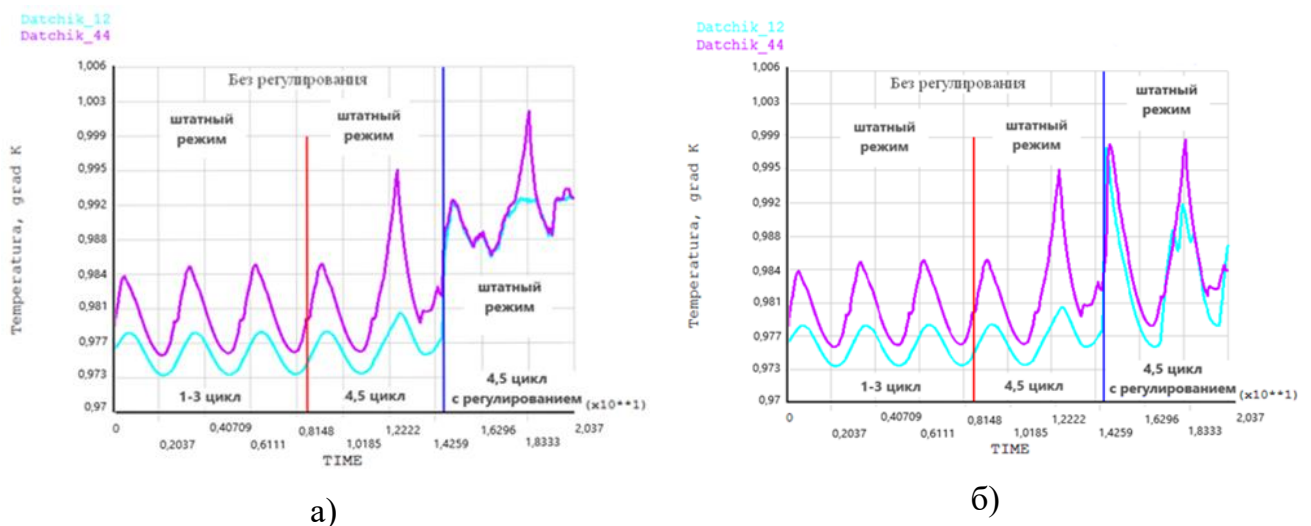
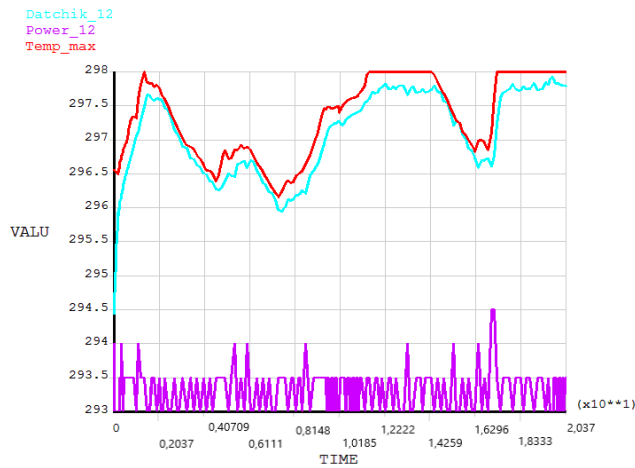
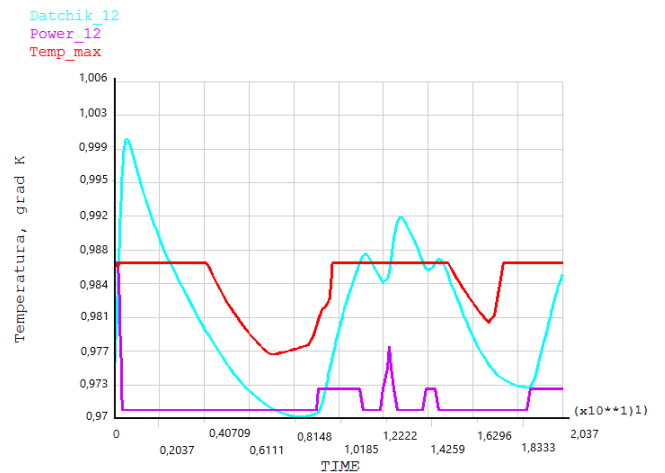


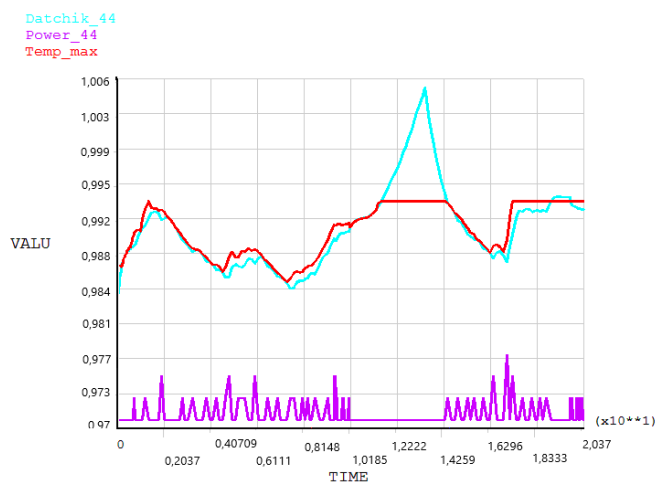
Рисунок 5.11 – Температура НК в зоне датчиков №12, №44 при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА



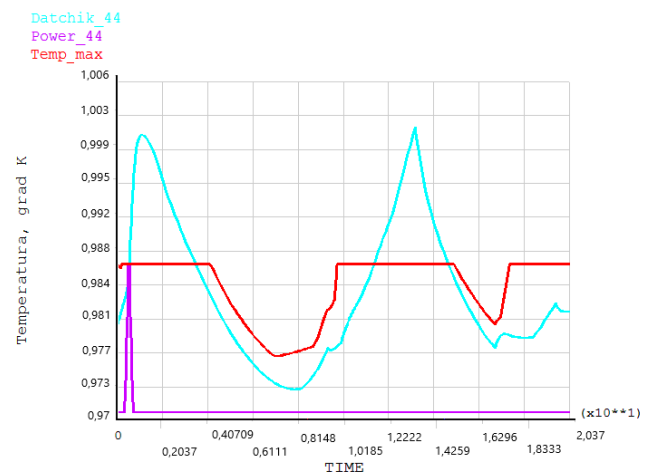
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.12 – Температура в зоне датчиков №12 (а, б) и №44 (в, г), мощности УИТ (Power_12, Power_44) и текущей и максимальной температуры НК (Temp_max) при непрерывном (а, в) и релейном (б, г) АТСТ НК ИИС КА

На рисунках 5.13, 5.14 приведены температурные перепады по толщине НК в зоне противоположащих датчиков. Из рисунков видно, что среднее значение температурного перепада при непрерывном алгоритме (а) работы САУ температурой НК ИИС КА уменьшилось в среднем на 0,5 ед. (1,5 К) по сравнению с релейным алгоритмом (б), а также в среднем на 0,17 ед. (0.5 К) с результатами моделирования без регулирования (4,5 цикл нагружения без регулирования). Также из рисунков видно, что максимальный температурный перепад наблюдается в зоне датчиков №12-44 (рисунок 5.11) и №27-59 (рисунок 5.14), что объясняется воздействием внешних тепловых потоков и тепловых потоков от аппаратуры, расположенной вблизи этих зон.

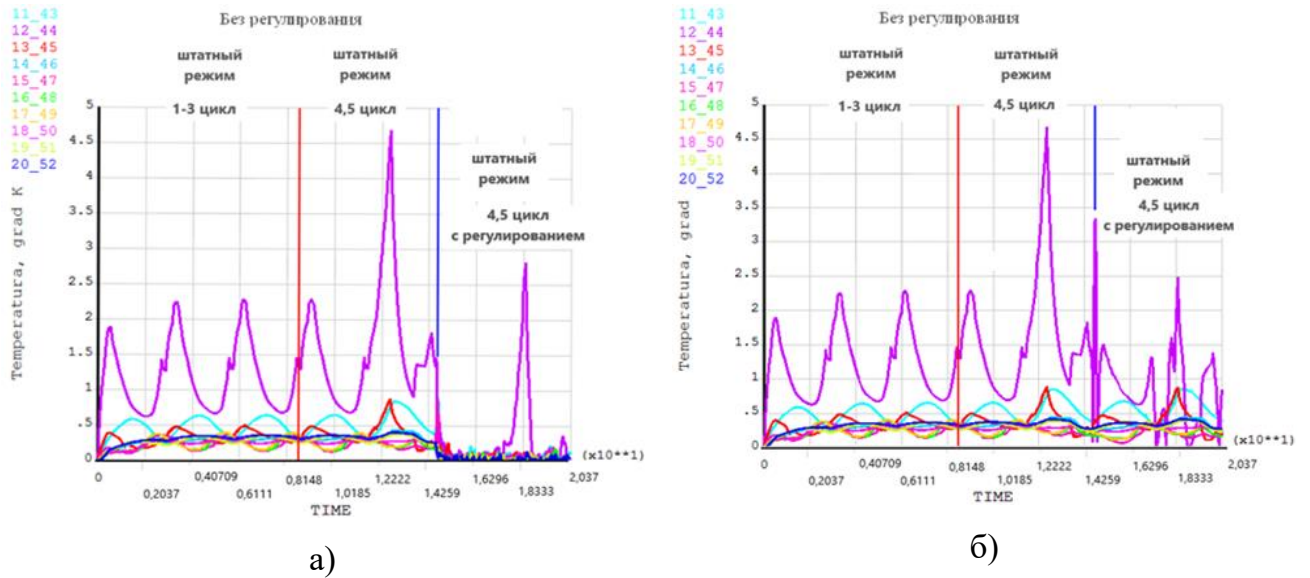


Рисунок 5.13 – Температурный перепад по толщине НК в зоне противоположащих датчиков при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

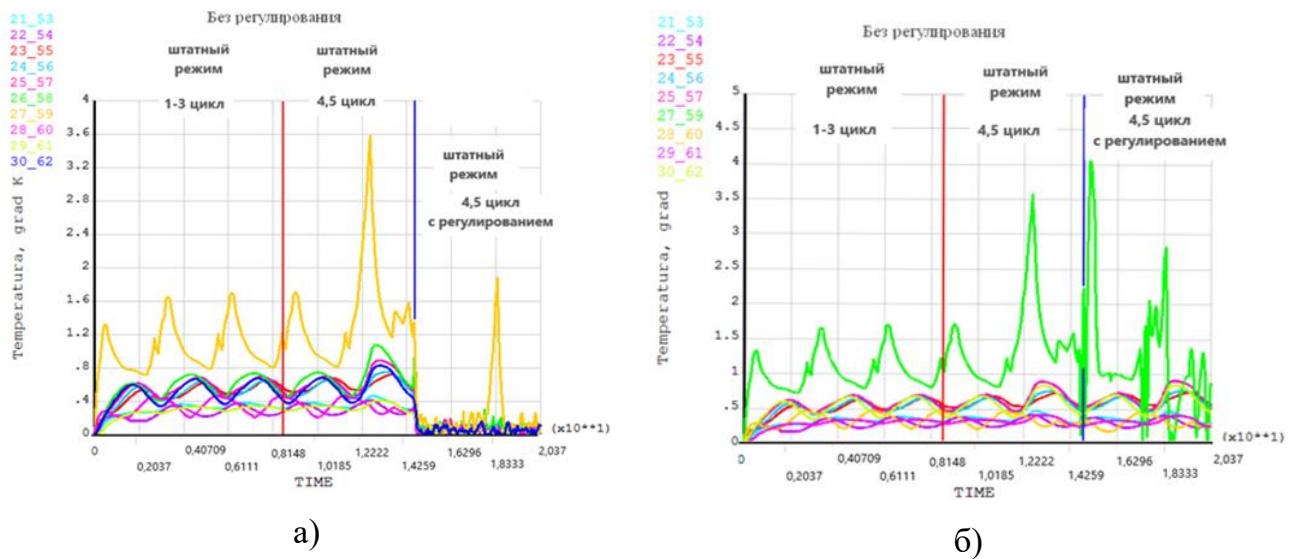


Рисунок 5.14 – Температурный перепад по толщине НК в зоне противоположащих датчиков при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

Для примера, на рисунке 5.15 приведены температура НК в зоне датчиков №30, №62 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ температурой НК ИИС КА. Из рисунка видно, что САУ с релейным алгоритмом (б) не функционирует, т.к. не выполняется условие срабатывания (величина температурного перепада по толщине НК в зоне датчиков №30-62 не превышает 0,44 ед. (1,3 К) согласно программе функционирования релейного алгоритма.

На рисунке 5.16 приведены температуры НК в зоне возмущений аппаратуры. Из рисунка видно, что элементы температурного регулирования, функционирующие по

непрерывному алгоритму (а), незначительно увеличивают среднюю температуру НК в этой зоне, по сравнению с элементами температурного регулирования, функционирующими по релейному алгоритму (б), на величину около 0,1 ед. (0,3 К).

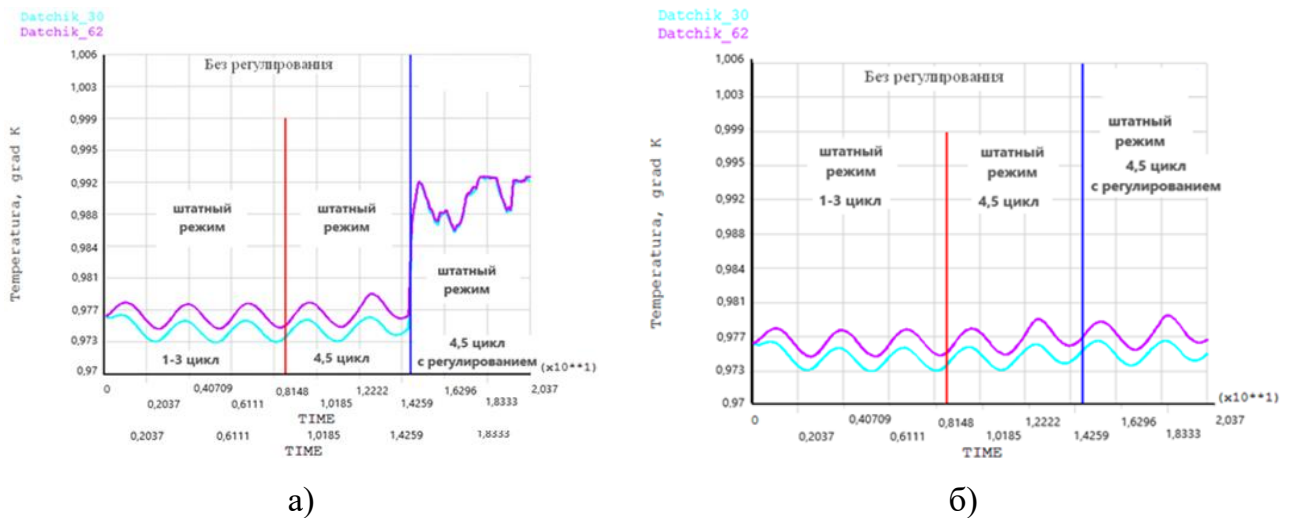


Рисунок 5.15 – Температура НК в зоне датчиков №30, №62 при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

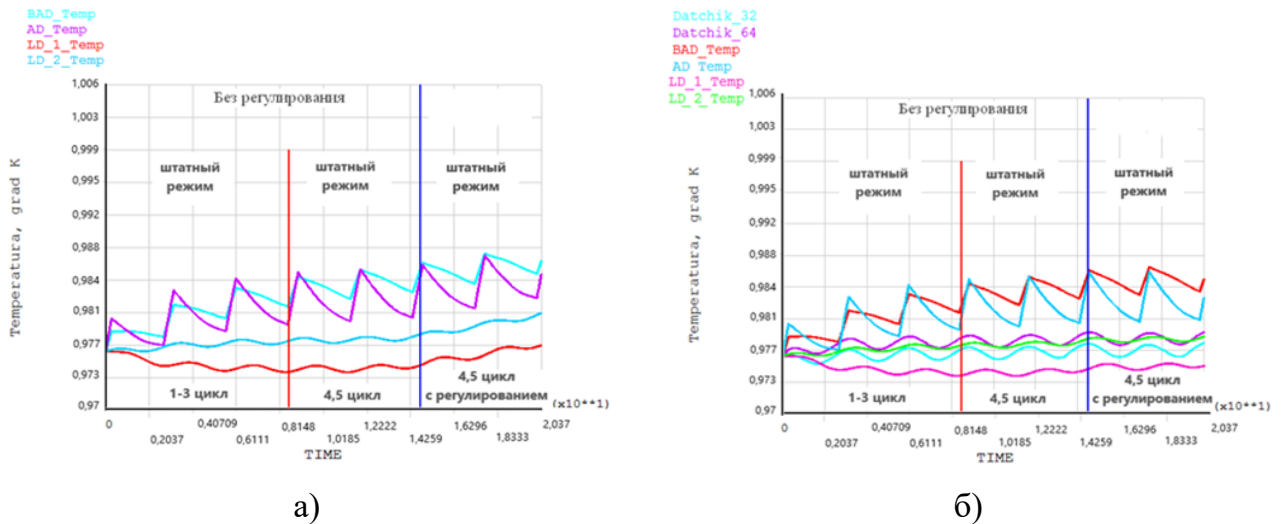


Рисунок 5.16 – Температура НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

На рисунке 5.17 представлены перепады по толщине НК осредненных температур по поверхностям плиты и каркаса НК при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА. Результаты сравнения показывают, что разность между величинами перепадов средних температур по каркасу и плите для непрерывного алгоритма составляет 0,05 ед. (0,16 К) и 0,04 ед. (0,12 К) соответственно, для релейного алгоритма – 0,07 ед. (0,22 К) и 0,06 ед. (0,2 К) соответственно, для режима моделирования без регулирования – 0,07 ед. (0,23 К) соответственно.

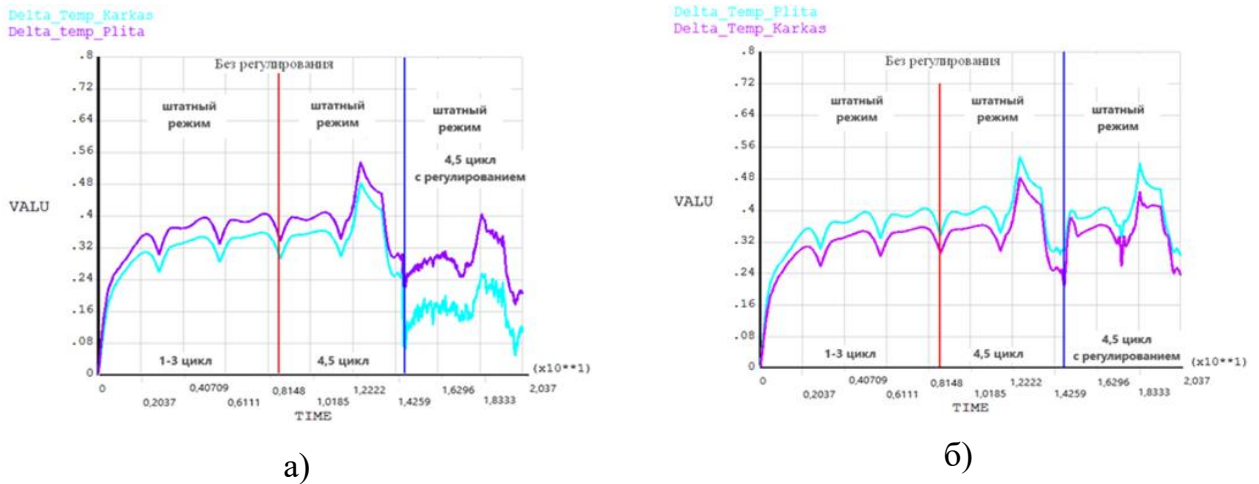


Рисунок 5.17 – Перепад по толщине НК осредненных температур по поверхностям плиты (Delta_temp_plita) и каркаса НК (Delta_temp_karkas) при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

При этом среднее значение перепада осредненных температур по поверхности плиты и каркаса для непрерывного алгоритма составляет 0,09 ед. (0,29 К) и 0,05 ед. (0,16 К) соответственно, для релейного алгоритма – 0,13 ед. (0,4 К) и 0,12 ед. (0,36 К) соответственно, для режима моделирования без регулирования – 0,13 ед. (0,41 К) и 0,12 ед. (0,38 К) соответственно.

На рисунке 5.18 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования с двух сторон НК на каждом шаге моделирования при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом функционирует практически синхронно для обеих сторон НК, при этом средняя суммарная мощность составляет 15.1 Вт. Пиковая суммарная мощность УИТ 112.5 Вт в начале работы объясняется условием функционирования непрерывного алгоритма, т.е. максимальный уровень мощности элементов температурного регулирования ($P_{i,j} = 3,5 \text{ Вт}$, $j = \overline{1,64}$) вызван большим отклонением текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64 и текущей заданной максимальной температуры, которая определяется как наибольшая среди всех значений текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64. АТСТ, функционирующий по релейному алгоритму (б), задает среднюю суммарную мощность элементов температурного регулирования – 0.9 Вт, что тоже объясняется условием функционирования релейного алгоритма и результатами моделирования, при этом режимы включения элементов температурного регулирования для 1 и 2 сторон НК – различны.

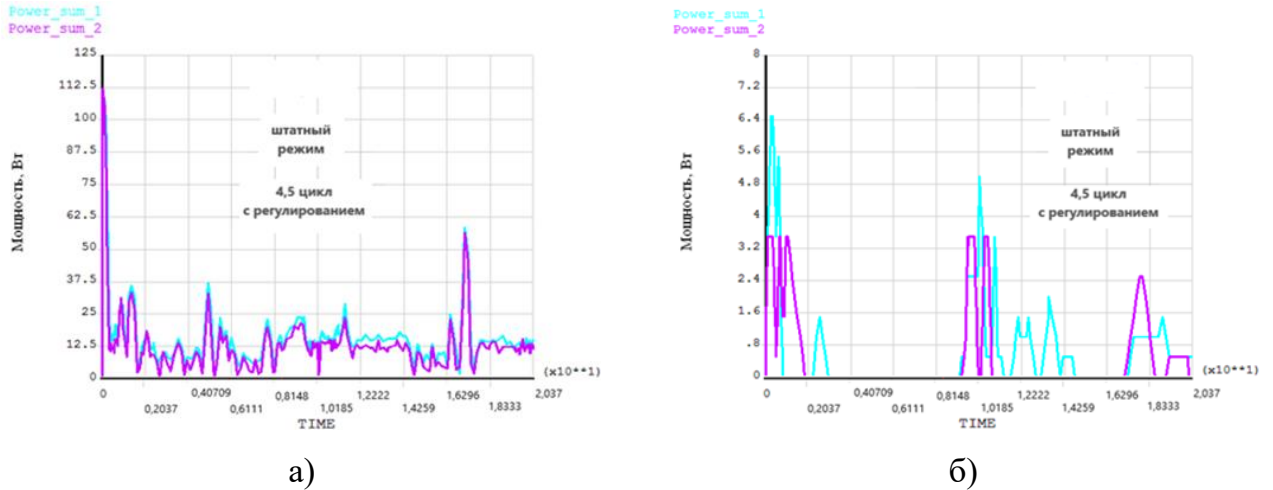


Рисунок 5.18 – Общая мощность элементов температурного регулирования на 2-х сторонах НК при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ НК ИИС КА

На рисунке 5.19 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования АТСТ в штатном режиме объектовой съемки, функционирующей по непрерывному (а) и релейному (б) алгоритмам. Результат сравнения показывает, что релейный алгоритм (б) в процессе функционирования обеспечивает практически 15-ти кратное снижение затрачиваемой мощности на цели регулирования по сравнению с непрерывным алгоритмом (а).

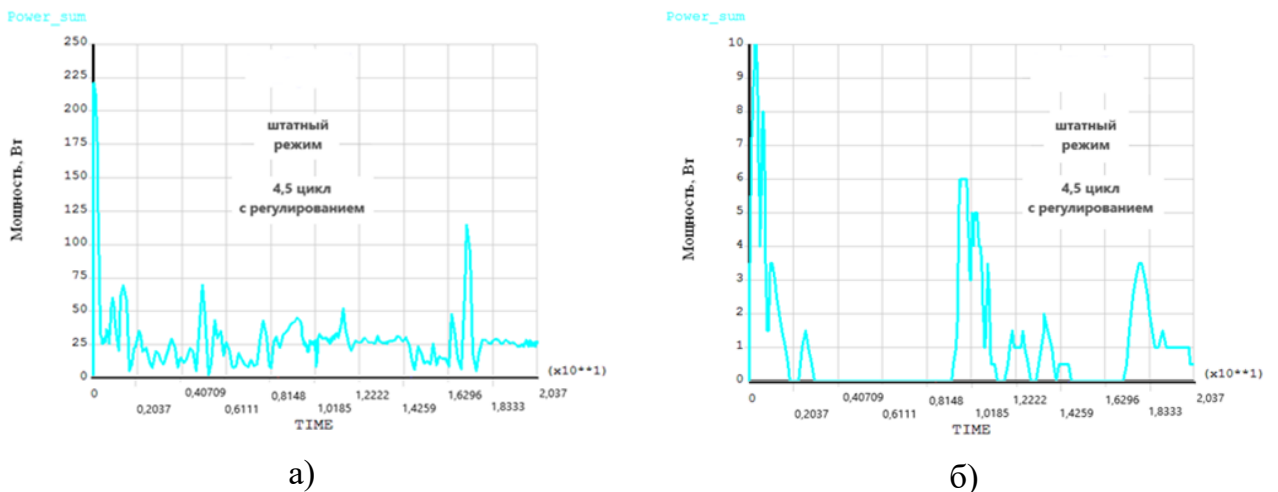


Рисунок 5.19 – Общая мощность элементов температурного регулирования НК при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

5.3.2 Штатный режим 2

На рисунках 5.20 - 5.24 приведены результаты численного моделирования температурного режима НК для одного из штатных режимов. Первые три цикла нагружения ($3\tau_n$) на рисунках - результаты моделирования температурного поля НК в штатном режиме без регулирования. Четвертый и пятый цикл нагружения

продолжительностью $2\tau_{ц}$ - штатный режим без регулирования. Шестой и седьмой цикл нагружения продолжительностью $2\tau_{ц}$ повторяют режим четвертого и пятого цикла нагружения, но с использованием АТСТ, функционирующего по непрерывному алгоритму (а) и АТСТ, функционирующего по релейному алгоритму (б).

На рисунке 5.20 приведена температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом (а) практически не уменьшает среднюю амплитуду колебаний температуры в зоне датчиков №1, №33 относительно режима моделирования без регулирования (4,5 цикл нагружения без регулирования) и на 1,56 ед. (4,6 К) относительно режима моделирования САУ с релейным алгоритмом (б).

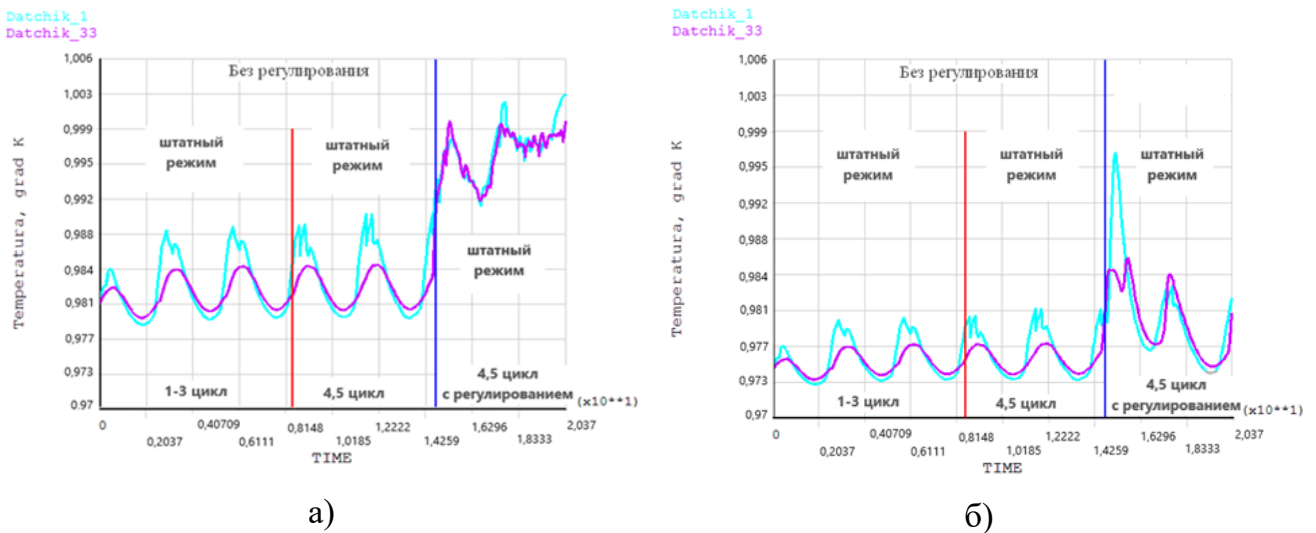
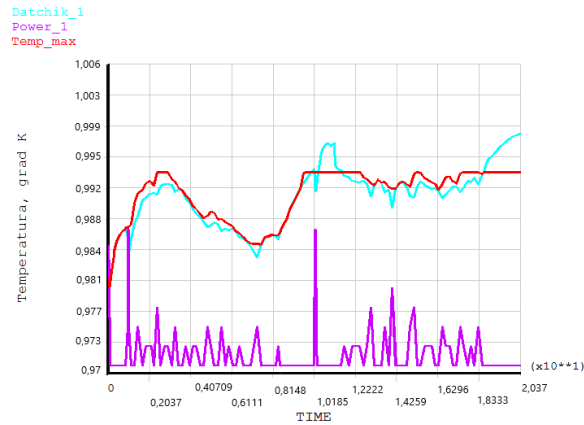
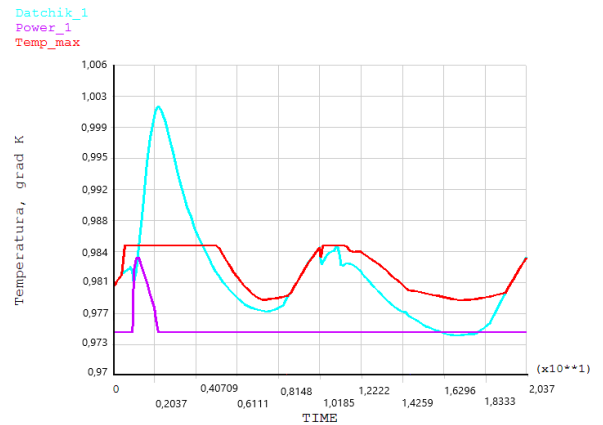


Рисунок 5.20 – Температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

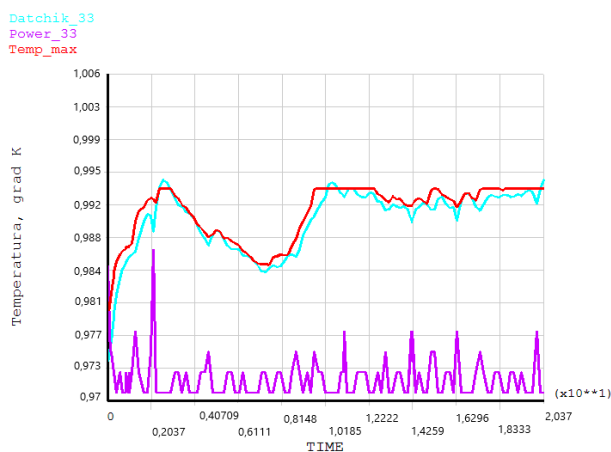
Для сравнения режимов работы АТСТ на рисунке 5.21 приведены относительные в не оцифрованном масштабе значения используемой мощности УИТ и соответствующие им температуры в зоне датчиков №1, №33, а также текущая заданная максимальная температура НК. Из рисунка видно, что непрерывный алгоритм (а, в) быстрее реагирует на колебания текущей заданной максимальной температуры НК и точнее обрабатывает внешние возмущения, чем релейный алгоритм (б, г). Так, при релейном алгоритме (б) в начале 4 цикла нагружения в зоне датчика №1 максимальное отклонение текущей температуры от текущего заданного максимального значения составляет 1,97 ед. (5,8 К), а для непрерывного алгоритма (а) это отклонение составляет 0,34 ед. (1 К), что объясняется различными условиями функционирования алгоритмов.



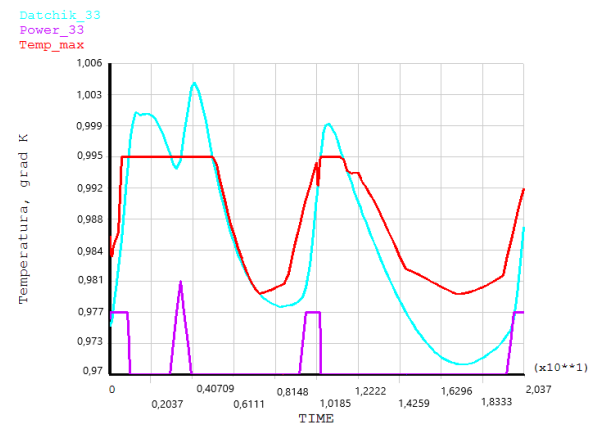
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.21 – Температура в зоне датчиков №1 (а, б) и №33 (в, г), мощности УИТ (Power_1, Power_33) и текущей заданной максимальной температуры НК (Temp_max) при непрерывном и релейном (б, г) АТСТ (а, в)

На рисунке 5.22 приведены температурные перепады по толщине НК в зоне противоположащих датчиков. Из рисунка видно, что максимальный температурный перепад в зоне датчиков №1-33 в режиме моделирования без регулирования в конце 5 цикла нагружения достигает значения 0,58 ед. (1,7 К), при этом САУ с непрерывным алгоритмом (а) обеспечивает уменьшение максимального температурного перепада до 0.43 ед. (1,3 К), а САУ с релейным алгоритмом (б) увеличивает максимальный температурный перепад до 1,7 ед. (5 К).

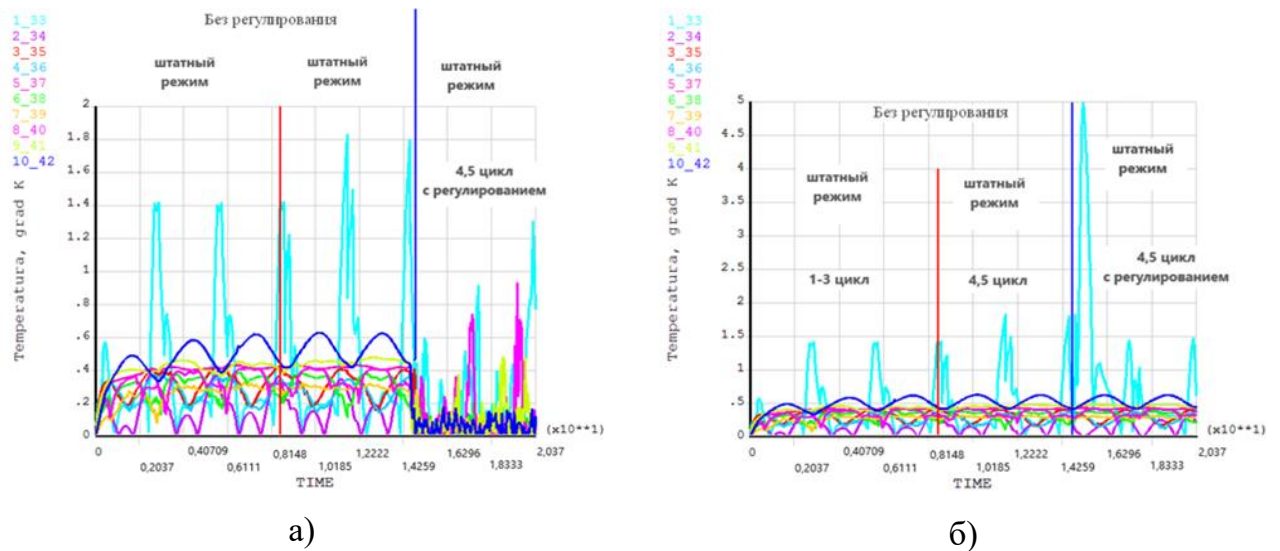


Рисунок 5.22 – Температурный перепад по толщине НК в зоне противоположащих датчиков при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

На рисунке 5.23 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования с двух сторон НК на каждом шаге моделирования при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме функционирования САУ температурой НК ИИС КА для штатного режима. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом функционирует практически синхронно для обеих сторон НК, при этом средняя суммарная мощность составляет 22.2 Вт. Пиковая суммарная мощность УИТ 102 Вт в начале работы объясняется условием функционирования непрерывного алгоритма (см раздел 2.6.2), т.е. максимальный уровень мощности элементов температурного регулирования ($P_{i,j} = 3,5 \text{ Вт}$, $j = \overline{1,64}$) вызван большим отклонением текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64 и текущей заданной максимальной температуры, которая определяется как наибольшая среди всех значений текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64. Релейный АТСТ по (б), задает среднюю суммарную мощность элементов температурного регулирования – 0.8 Вт, что тоже объясняется условием функционирования релейного алгоритма и результатами.

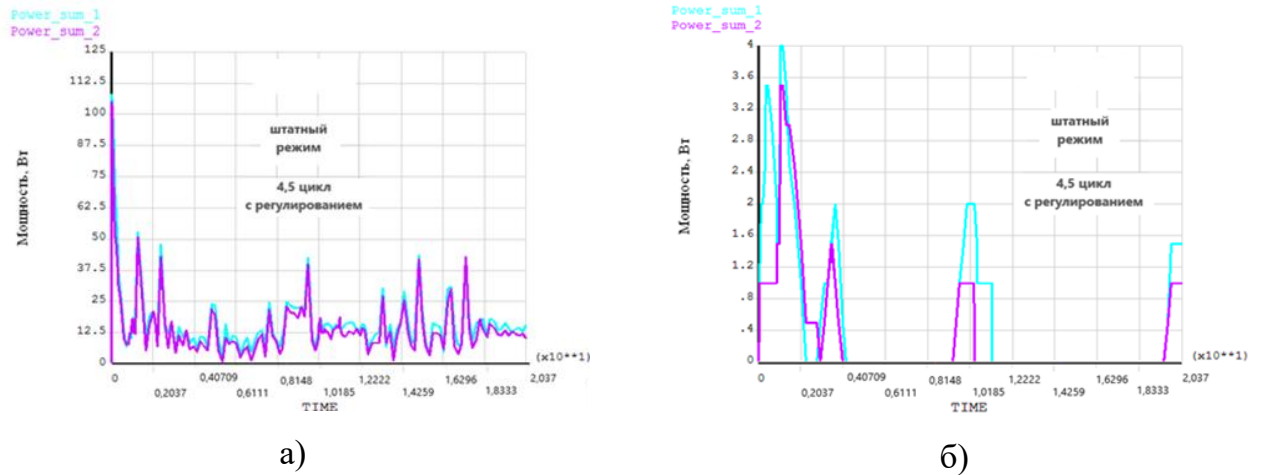


Рисунок 5.23 – Суммарные мощности всех элементов температурного регулирования

На рисунке 5.24 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования для АТСТ КА в штатном режиме, функционирующей по непрерывному (а) и релейному (б) законам. Результат сравнения показывает, что релейный алгоритм (б) в процессе функционирования обеспечивает практически 30-ти кратное снижение затрачиваемой мощности на цели регулирования по сравнению с непрерывным алгоритмом (а).

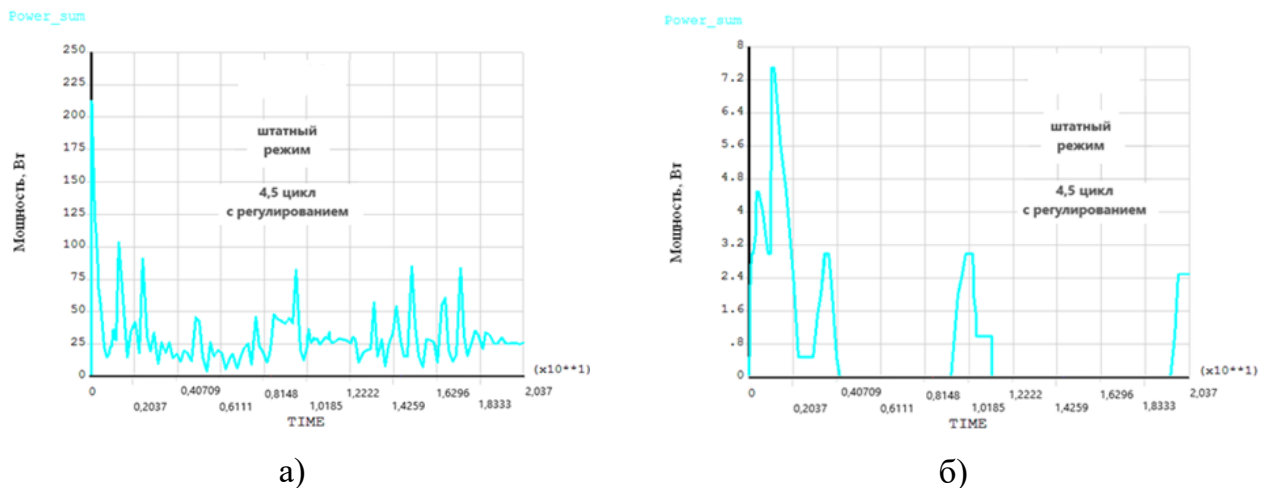


Рисунок 5.24 – Суммарные мощности всех элементов температурного регулирования

5.3.3 Нештатный режим

На рисунках 5.25 – 5.31 приведены результаты численного моделирования температурного режима НК для нештатного режима. Первые три цикла нагружения на рисунках - результаты моделирования температурного поля НК в штатном режиме работы без регулирования. Четвертый и пятый цикл нагружения продолжительностью $2\tau_{ц}$ - нештатный режим работы без регулирования. Шестой и седьмой цикл нагружения продолжительностью $2\tau_{ц}$ повторяют режим четвертого и пятого цикла нагружения, но с

использованием САУ, функционирующей по непрерывному алгоритму (а) и АТСТ, функционирующего по релейному закону (б).

На рисунке 5.25 приведена температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме функционирования. Из рисунка видно, что АТСТ с непрерывным законом (а) уменьшает среднюю амплитуду колебаний температуры в зоне датчиков №1, №33 на 1,46 ед. (4,3 К) относительно режима моделирования без регулирования (4,5 цикл нагружения без регулирования) и на 3,58 ед. (10,5 К) относительно режима моделирования АТСТ с релейным законом (б).

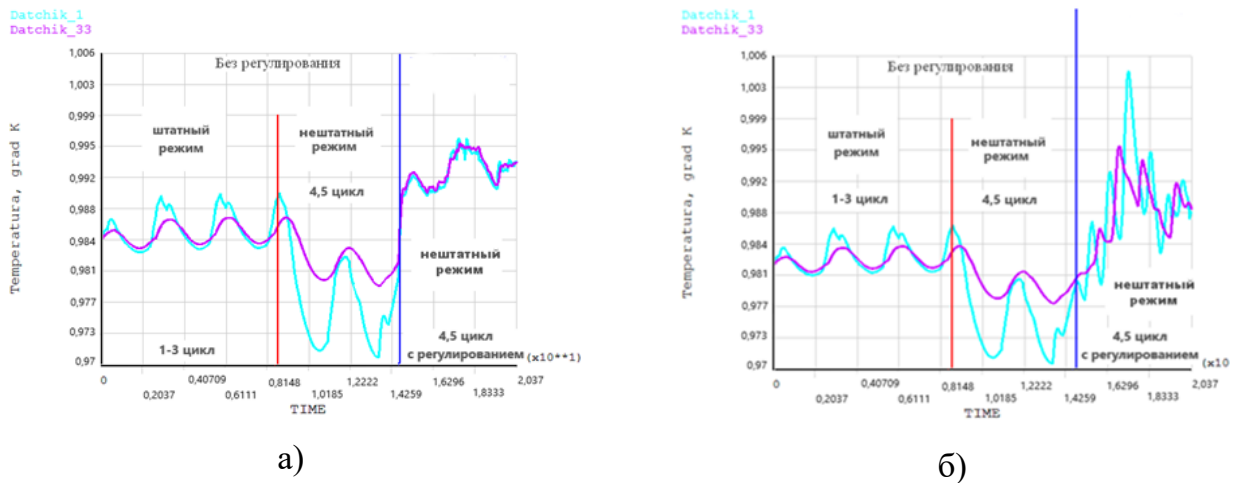
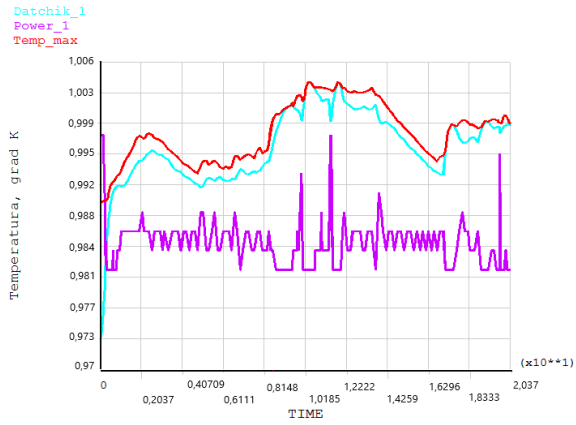


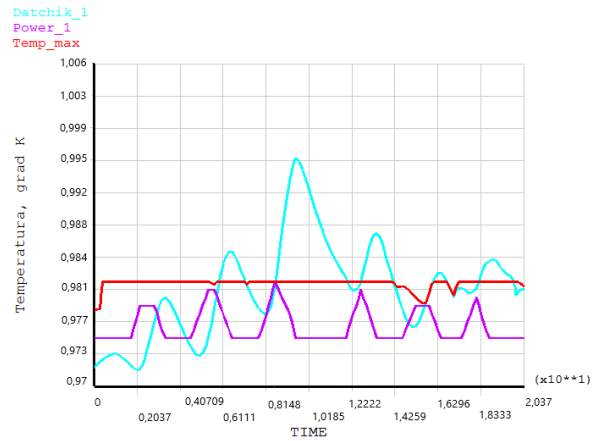
Рисунок 5.25 – Температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

Для сравнения режимов работы АТСТ, на рисунке 5.26 приведены относительные в не оцифрованном масштабе значения используемой мощности элементов температурного регулирования и соответствующие им температуры в зоне датчиков №1, №33, а также текущая заданная максимальная температура НК.

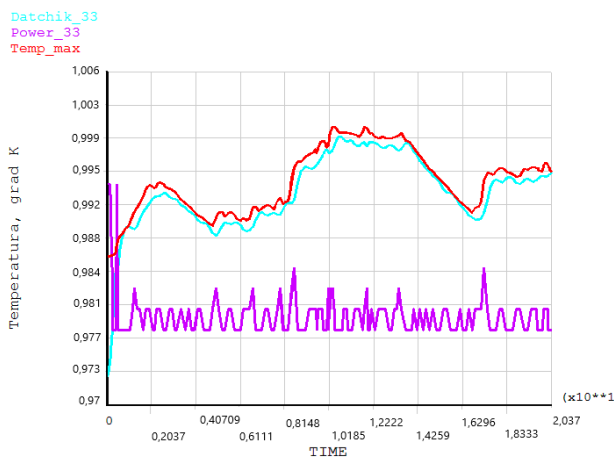
Из рисунка 5.26 видно, что при релейном алгоритме (б, г), так же, как и для штатных обычного и режима работы, максимальное отклонение температуры от заданного максимального значения по условиям функционирования алгоритма в зоне датчика №1 составляет 2,59 ед. (7,6 К), в зоне датчика №33 составляет 1,12 ед. (3,3 К). Тогда как то же максимальное отклонение при непрерывном алгоритме в зоне датчика №1 не превышает 0,13 ед. (0,4 К), в зоне датчика №33 не превышает 0,06 ед. (0,2К).



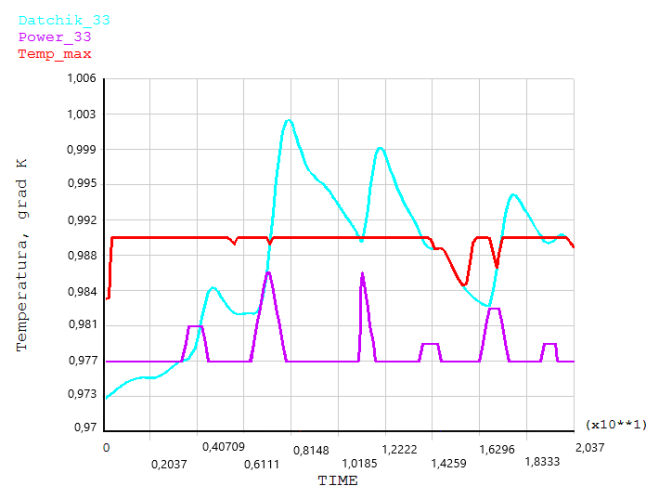
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.26 – Температура в зоне датчиков №1 (а, б) и №33 (в, г), мощности УИТ (Power_1, Power_33) и текущей заданной максимальной температуры НК (Temp_max) при непрерывном (а, в) и релейном (б, г) АТСТ

На рисунке 5.27 приведены температурные перепады по толщине НК в зоне противоположащих датчиков. Из рисунка видно, что максимальный температурный перепад в зоне датчиков №1-33 в режиме моделирования без регулирования достигает значения 1,19 ед. (3,5 К), при этом САУ с непрерывным алгоритмом (а) обеспечивает уменьшение максимального температурного перепада до 0,27 ед. (0,8 К), а САУ с релейным алгоритмом (б) увеличивает максимальный температурный перепад до 2,08 ед. (6,1 К).

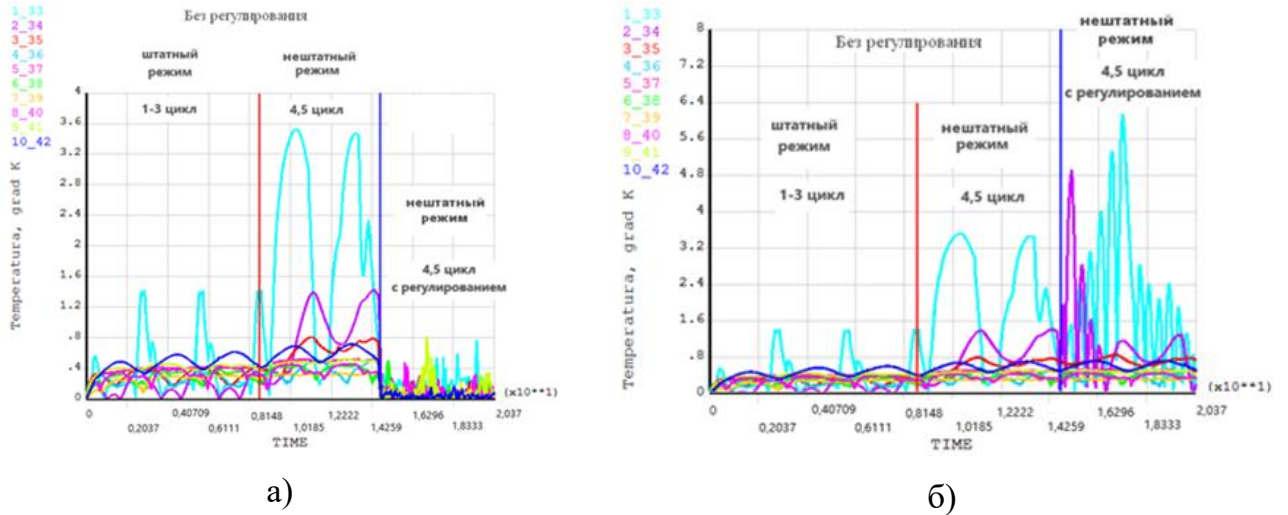


Рисунок 5.27 – Температурный перепад по толщине НК в зоне противоположащих датчиков при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

На рисунке 5.28 приведены температуры НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2. Из рисунка видно, что элементы температурного регулирования, функционирующие по непрерывному алгоритму (а), незначительно увеличивают среднюю температуру НК в этой зоне, по сравнению с элементами температурного регулирования, функционирующими по релейному алгоритму (б) на величину около 0,03 ед. (0,1 К).

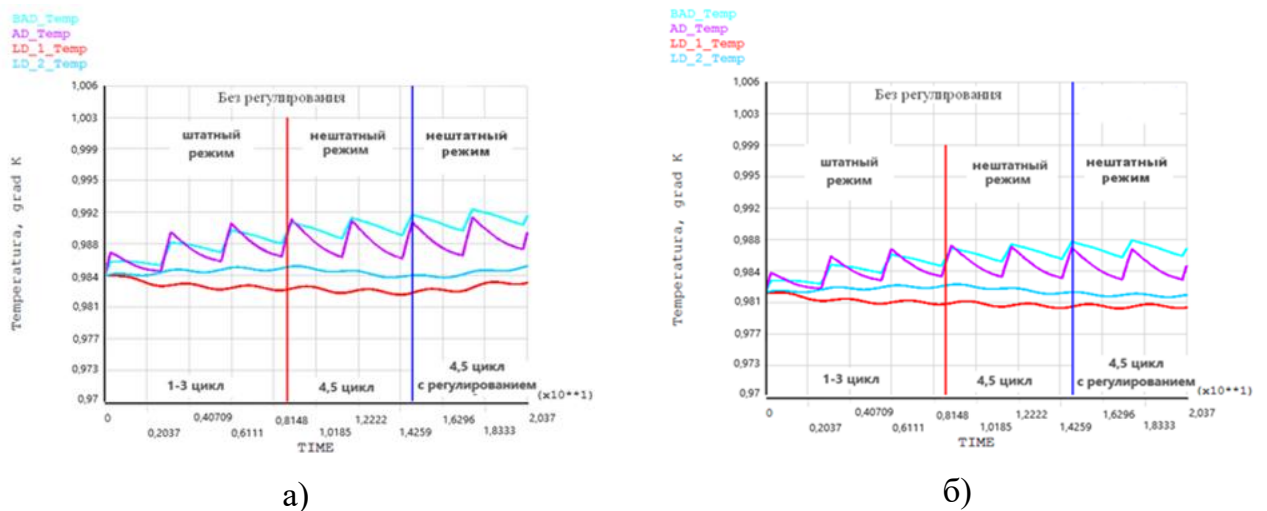


Рисунок 5.28 – Температура НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

При сравнении температур корпусов Оболочки 1,2 в зоне зеркал, приведенных на рисунке 5.29, можно заметить, что при релейном алгоритме (б) средняя амплитуда колебаний температуры в зоне зеркал практически не изменяется по сравнению с непрерывным алгоритмом (а). Тогда как средняя температура в зоне зеркал при непрерывном алгоритме выше средней температуры при релейном на 0,03 ед. (0,1 К).

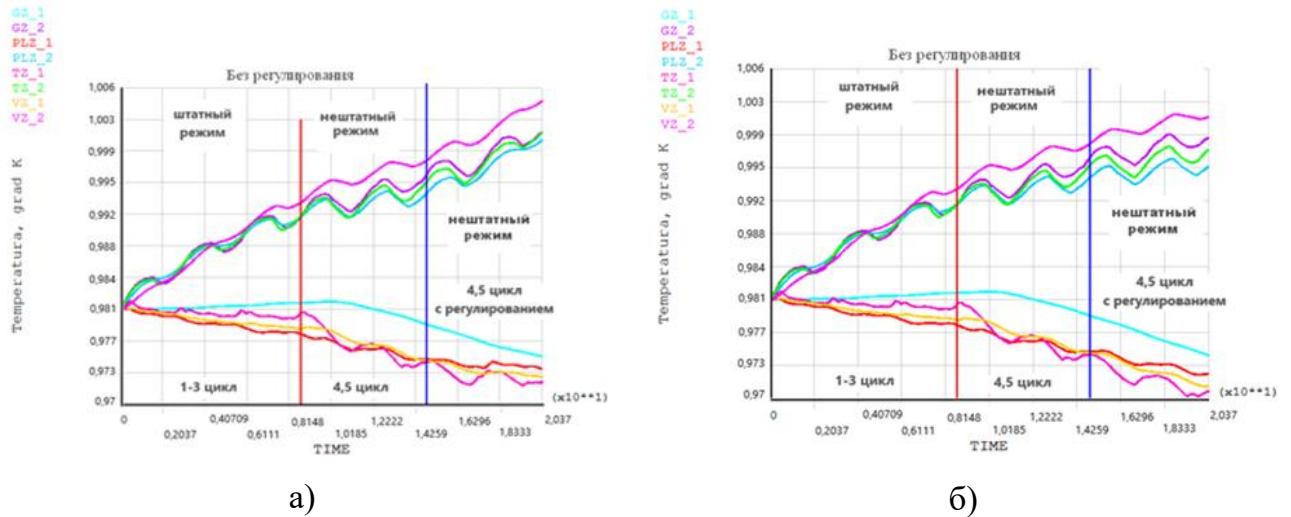


Рисунок 5.29 – Температура НК в зоне зеркал (GZ-главное зеркало, PLZ- плоское зеркало, TZ-третье зеркало, VZ- вторичное зеркало) при непрерывном (а) и релейном (б)

АТСТ

На рисунке 5.30 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования с двух сторон НК на каждом шаге моделирования при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом функционирует практически синхронно для обеих сторон НК, средняя суммарная мощность на каждом шаге моделирования составляет 18,1 Вт. Пиковая суммарная мощность УИТ 102 Вт в начале работы объясняется условием функционирования непрерывного алгоритма, т.е. максимальный уровень мощности элементов температурного регулирования вызван большим отклонением текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64 и текущей заданной максимальной температуры, которая определяется как наибольшая среди всех значений текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64 (см. рисунок 5.23 а, в).

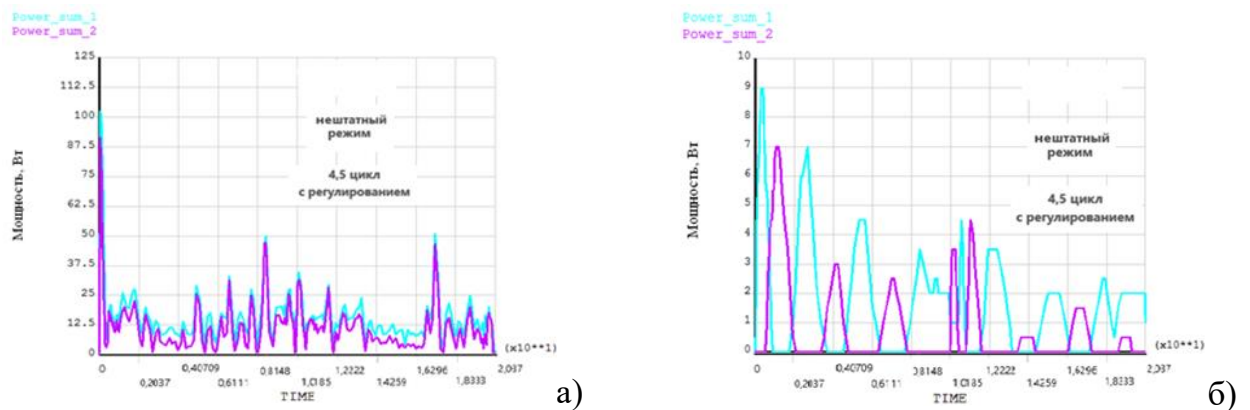


Рисунок 5.30 – Общая мощность элементов температурного регулирования на 2-х сторонах НК при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

САУ с релейным алгоритмом (б) обеспечивает среднюю суммарную мощность элементов температурного регулирования 2.2 Вт, что тоже объясняется условием функционирования релейного алгоритма и результатами моделирования, при этом режимы включения элементов температурного регулирования для 1 и 2 сторон НК – различны.

На рисунке 5.31 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования для АТСТ в нештатном режиме работы, функционирующей по непрерывному (а) и релейному (б) законам. Результат сравнения показывает, что релейный алгоритм (б) в процессе функционирования обеспечивает в среднем 9-ти кратное снижение затрачиваемой мощности на цели регулирования по сравнению с непрерывным алгоритмом (а).

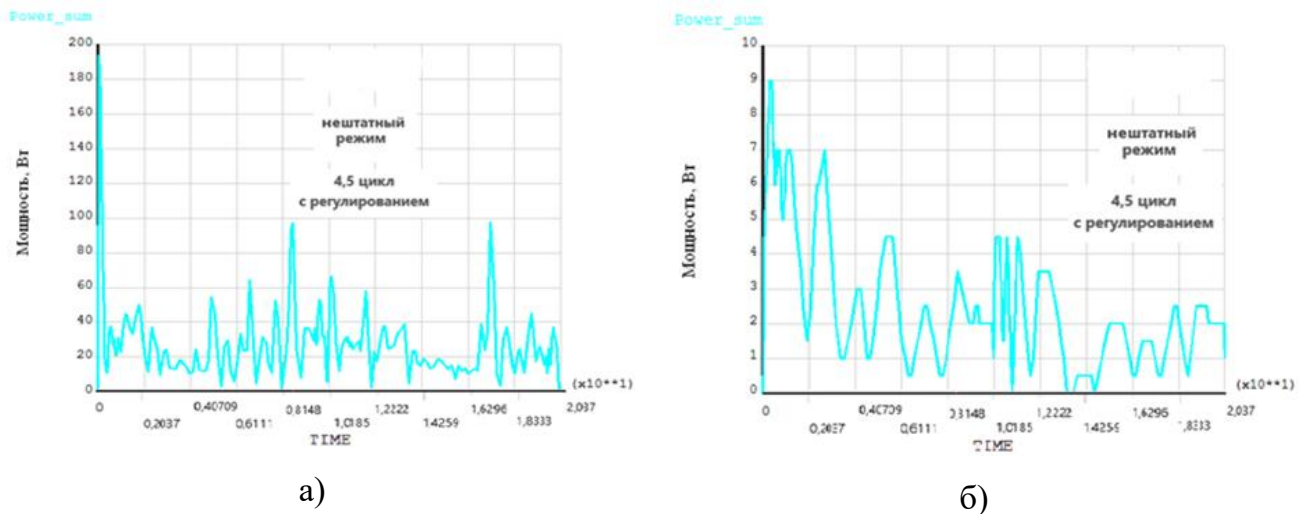


Рисунок 5.31 – Общая мощность элементов температурного регулирования НК при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

5.3.4 Нештатный режим 2

На рисунках 5.32-5.39 приведены результаты численного моделирования температурного режима НК для нештатного режима. Первые три цикла нагружения на рисунках - результаты моделирования температурного поля НК в штатном режиме работы без регулирования. Четвертый и пятый цикл нагружения продолжительностью $2\tau_{ц}$ - режим нештатного режима без регулирования. Шестой и седьмой цикл нагружения продолжительностью $2\tau_{ц}$ повторяют режим четвертого и пятого цикла нагружения, но с использованием САУ, функционирующей по непрерывному алгоритму (а) и САУ, функционирующей по релейному алгоритму (б).

На рисунке 5.32 приведена температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом (а) уменьшает среднюю амплитуду колебаний температуры в зоне датчиков №1, №33 на 0,61 ед. (1,8 К) относительно режима моделирования без регулирования (4,5 цикл нагружения без регулирования) и на 0,40 ед. (1,2 К) относительно режима моделирования САУ с релейным алгоритмом (б).

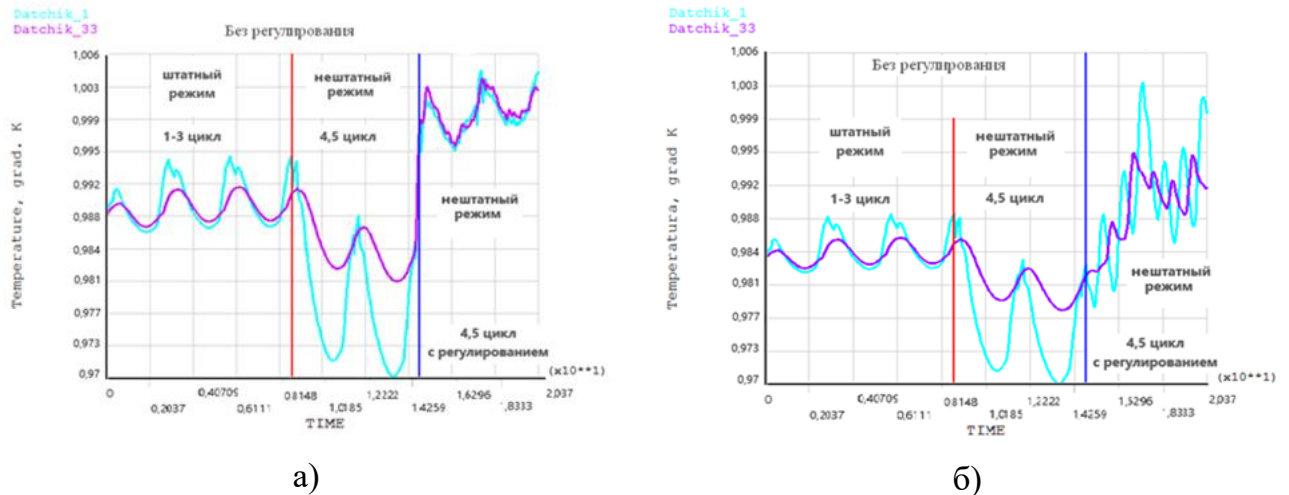
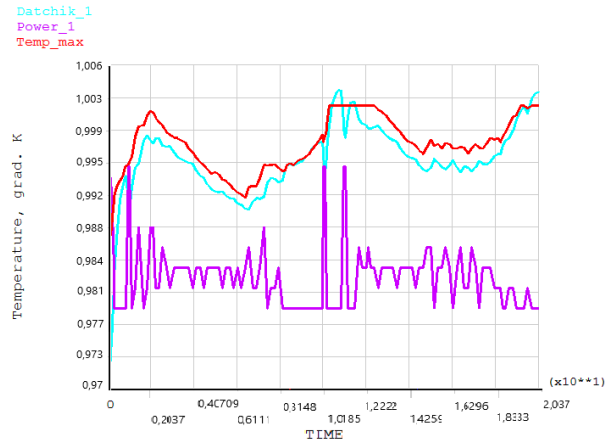


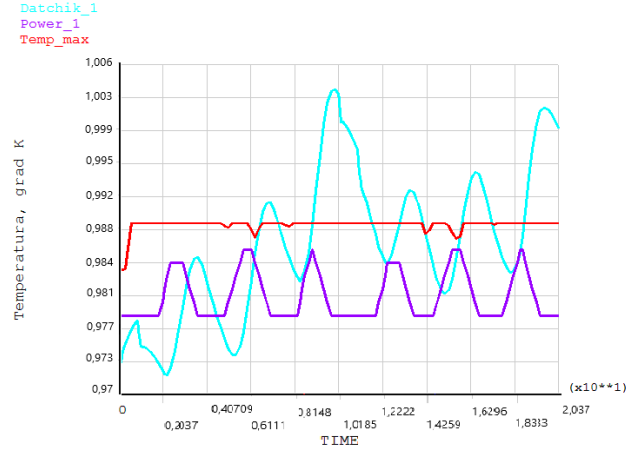
Рисунок 5.32 – Температура НК в зоне датчиков №1, №33 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

Для сравнения режимов работы АТСТ, на рисунке 5.33 приведены относительные в не оцифрованном масштабе значения используемой мощности элементов температурного регулирования и соответствующие им температуры в зоне датчиков №1, №33, а также текущая заданная максимальная температура НК.

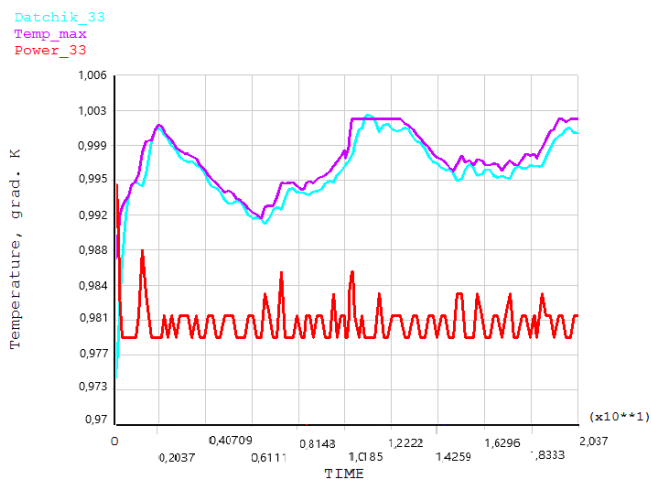
Из рисунка 5.33 видно, что при релейном алгоритме (б, г), так же, как и для режима штатной съемки (см. рисунки 5.7, 5.21), нештатного режима (см. рисунок 5.24), максимальное отклонение температуры от заданного максимального значения по условиям функционирования алгоритма в зоне датчика №1 составляет 1,67 ед. (4,9 К), в зоне датчика №33 – 0,53 ед. (1.6 К). Тогда как то же максимальное отклонение при непрерывном алгоритме в зоне датчика №1 не превышает 0,15 ед. (0,45 К), в зоне датчика №33 не превышает 0,06 ед. (0,2 К).



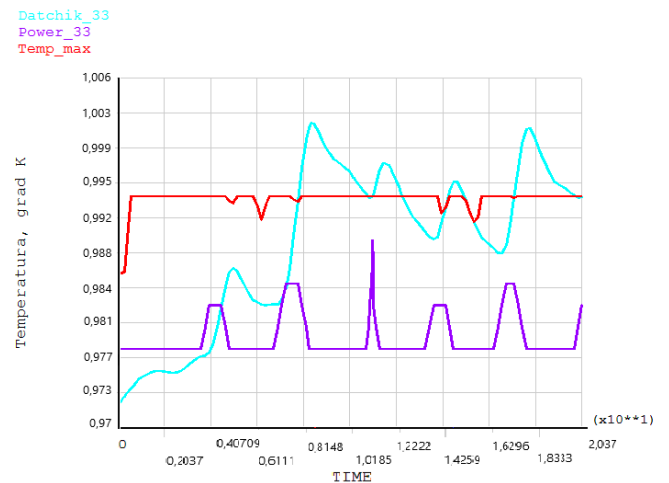
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.33 – Температура в зоне датчиков №1 (а, б) и №33 (в, г), мощности УИТ (Power_1, Power_33) и текущей заданной максимальной температуры НК (Temp_max) при непрерывном (а, в) и релейном (б, г) АТСТ

На рисунке 5.34 приведены температурные перепады по толщине НК в зоне противоположащих датчиков. Из рисунка видно, что максимальный температурный перепад в зоне датчиков №1-33 в режиме моделирования без регулирования достигает значения 1,22 ед. (3,6 К), при этом САУ с непрерывным алгоритмом (а) обеспечивает уменьшение максимального температурного перепада до 0,34 ед. (1 К), а САУ с релейным алгоритмом (б) увеличивает максимальный температурный перепад до 1,5 ед. (4,4 К).

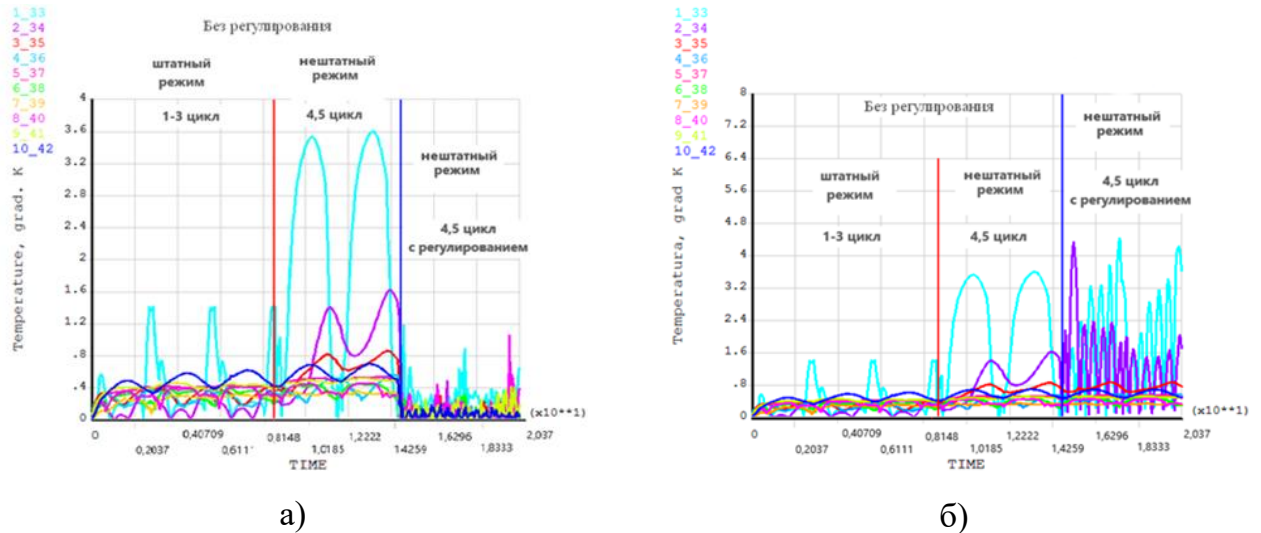
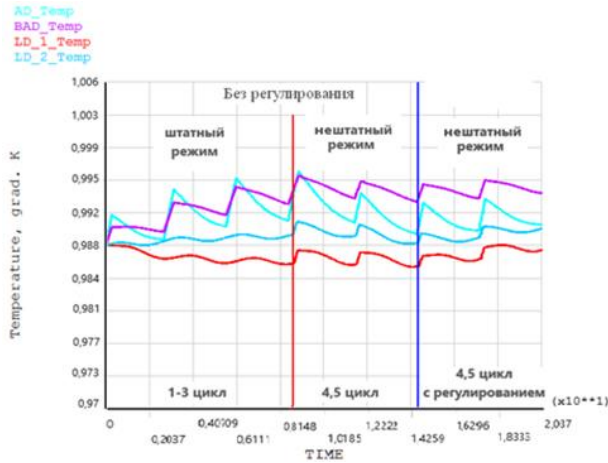
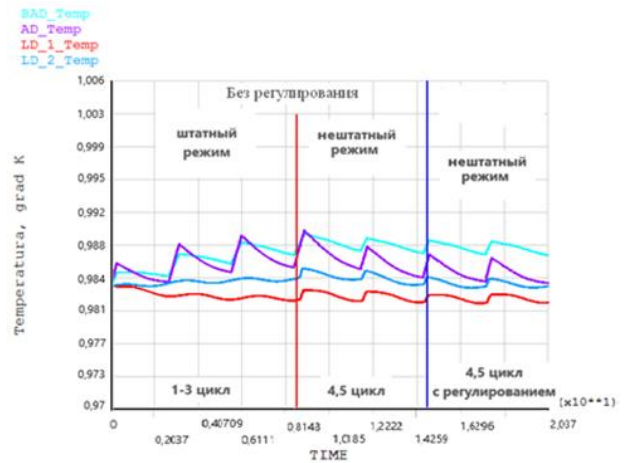


Рисунок 5.34 – Температурный перепад по толщине НК в зоне противоположащих датчиков при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

На рисунке 5.35 приведены температуры НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2. Из рисунка видно, что УИТ, функционирующие по непрерывному алгоритму (а), незначительно увеличивают среднюю температуру НК в этой зоне, по сравнению с элементами температурного регулирования, функционирующими по релейному алгоритму (б) на величину около 0,05 ед. (0,515 K). На рисунке 5.36 приведен температурный перепад по толщине НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2и противоположащих им зон на другой стороне НК. Из рисунка видно, что средний температурный перепад по толщине НК в зоне Pa и Pb, для непрерывного (а) и релейного (б) алгоритма практически не изменяется. Для зоны Pld2 средний температурный перепад при непрерывном алгоритме составляет 0,17 ед. (0.51 K), при релейном – 0,20 ед. (0,61 K). Тогда как для зоны Pld1средний температурный перепад при непрерывном алгоритме составляет 0,19 ед. (0,57 K), при релейном – 0,16 ед. (0,45 K). Такой результат свидетельствует прежде всего о различных условиях функционирования непрерывного и релейного алгоритмов.

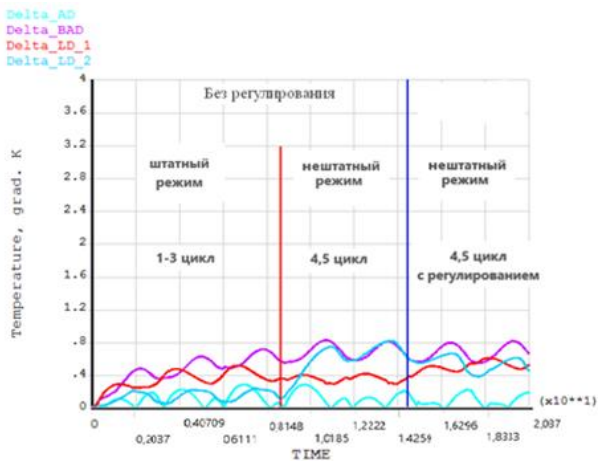


а)

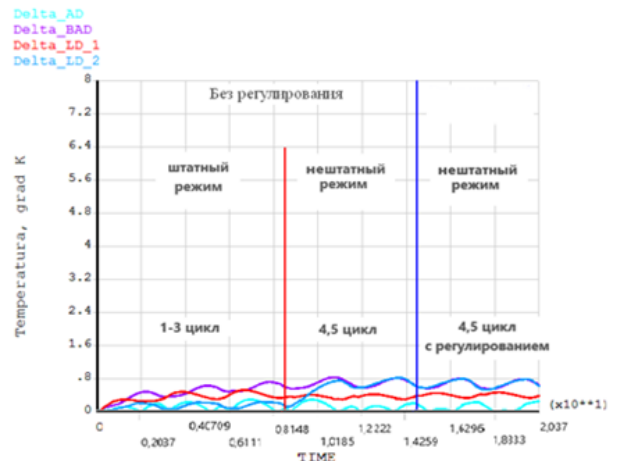


б)

Рисунок 5.35 – Температура НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2 при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ



а)



б)

Рисунок 5.36 – Температурный перепад по толщине НК в зоне аппаратуры Pa, Pb, Pld1, Pld2 и противоположащих им произвольных точек при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ

На рисунке 5.37 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования с двух сторон НК на каждом шаге моделирования при непрерывном (а) и релейном (б) АТСТ. Из рисунка видно, что САУ с непрерывным алгоритмом функционирует практически синхронно для обеих сторон НК, средняя суммарная мощность на каждом шаге моделирования составляет 17,8 Вт. Пиковая суммарная мощность УИТ 103 Вт в начале работы объясняется условием функционирования непрерывного алгоритма, т.е. максимальный уровень мощности УИТ вызван большим отклонением текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64 и текущей заданной

максимальной температуры, которая определяется как наибольшая среди всех значений текущей температуры НК в зоне датчиков №1-64 (см. рисунок 5.30 а, в).

САУ с релейным алгоритмом (б) обеспечивает среднюю суммарную мощность элементов температурного регулирования 2.3 Вт, что тоже объясняется условием функционирования релейного алгоритма и результатами моделирования, при этом режимы включения элементов температурного регулирования для 1 и 2 сторон НК – различны.

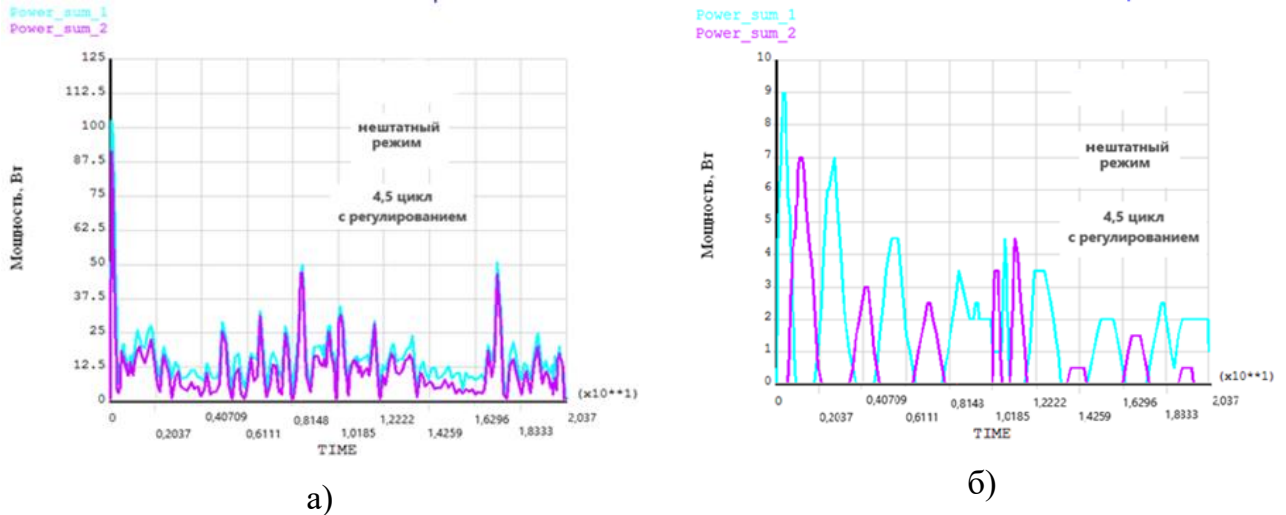


Рисунок 5.37 – Общая мощность элементов температурного регулирования на 2-х сторонах НК при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

На рисунке 5.38 приведены суммарные мощности всех элементов температурного регулирования АТСТ в нештатном режиме работы, функционирующей по непрерывному (а) и релейному (б) законам. Результат сравнения показывает, что релейный алгоритм (б) в процессе функционирования обеспечивает в среднем 9-ти кратное снижение затрачиваемой мощности на цели регулирования по сравнению с непрерывным алгоритмом (а).

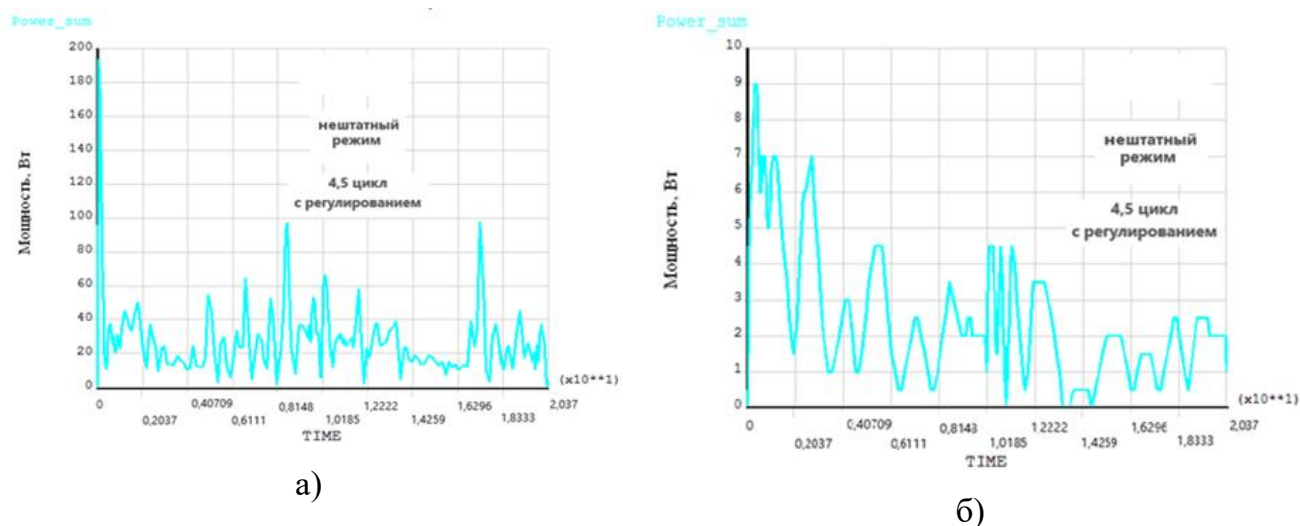


Рисунок 5.38 – Общая мощность элементов температурного регулирования НК при непрерывном (а) и релейном (б) алгоритме работы САУ температурой НК ИИС КА

5.4 Выводы по пятой главе

1. Разработаны два эффективных алгоритма термоградиентной стабилизации температуры НК ИИС КА для супервизорного автоматического управления в подсистеме управления температурой, отличающихся друг от друга энергоемкостью, вычислительной ресурсоемкостью, качественными показателями поддержки заданного температурного режима.

2. Проведено имитационное моделирование нелинейной модели в среде Ansys, свободной, от принятых при разработке локальных алгоритмов и САУ, допущений в различных режимах работы КА рассматриваемого типа.

3. В ходе имитационного моделирования установлена эффективность обоих алгоритмов и локальных САУ. При этом средняя амплитуда колебаний в относительных единицах в непрерывном алгоритме на 0.15 единиц (0.5 K) меньше по сравнению с режимом без регулирования и на 1.04 единицы (3.12 K) меньше по сравнению с релейным алгоритмом.

4. Быстродействие непрерывного алгоритма значительно выше, чем у релейного (17 сек. и 120 сек. при открытии люков), максимальное значение пиков отклонений температуры 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. (0.8 K) и 0.51 ед. (1.5 K) в относительных единицах).

5. 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.

6. Средний температурный перепад по толщине НК у релейного алгоритма незначительно ниже, чем в непрерывном.

7. Можно констатировать по результатам имитационного моделирования, что существенная энергоэффективность релейного алгоритма по сравнению с непрерывным, достигнута за счет снижения качества температурного режима НК. В случае удовлетворения качеством, можно рекомендовать релейный алгоритм. Для удовлетворения требованиям технического задания в рассматриваемом типе КА следует использовать непрерывный алгоритм.

6 Оптимальное управление температурным распределением в ответственном сечении НК

6.1 Постановка задачи

Для снижения энергетического и массогабаритного показателей СОТР, рассмотрим возможность достижения оптимального температурного распределения не всей НК, а только в ее заданных ответственных сечениях с помощью ограниченного количества УИТ в СОТР.

Исследования в этом направлении проводились в работах [33, 40], однако они были направлены на создание автоматической системы стабилизации заданной температуры сечения НК ИИС КА, определяющим образом влияющих на термодетормацию. В этом разделе рассматривается применение КА той же, что и ранее конструкции, но с ограниченной областью использования, что позволяет выделить ответственное за термодетормацию НК ее сечение, снизить требования к погрешности температурного режима и не рассматривать ряд возмущений в качестве актуальных. В диссертации разработан алгоритм оптимального управления мощностью УИТ в ответственном сечении НК ИИС КА, обеспечивающий при заданном расположении УИТ наименьшее отклонение температуры в этом сечении от требуемого уровня за минимально возможное время. В качестве критерия оптимальности при постановке задачи максимальной точности в диссертации применяется Чебышевская норма $\|\cdot\|_{L_\infty[M \in L^*]}$:

$$J = \theta(x, y, z, \tau_k - \theta_{spec})_{L_\infty[M^* \in L^*]} = \max_{M \in L^*} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}| \quad (6.1)$$

$$L^* = \left\{ x: x \in [0, R_1], y^* = \overline{0, 0.5R_2}, z^* = \overline{0, 0.5R_3} \right\}, \theta_{spec} = const, M^* \in L^*$$

которая отражает неравномерность температурного распределения по линии ответственного сечения $L^*(x)_{y=y^*, z=z^*}$.

Здесь τ_k – время завершения процесса регулирования температуры (компенсации возмущения).

Рассмотрим актуальную задачу определения алгоритма управления мощностью $P_{ii}(\tau)$ УИТ, обеспечивающего при их заданном количестве и расположении, минимальное отклонение $\tilde{\theta}(M, \tau)|_{\tau=\tau_k} = |\theta(M^*, \tau)|_{\tau=\tau_k} - \theta_{spec}(\tau_k)|$ от требуемой температуры θ_{spec} в

заданном сечении НК. Выбор ответственного сечения определяется комплексным решением термдеформационной и оптикомеханической задач для соответствующей компоновки оборудования на НК [33].

В рассматриваемом в этом разделе примере использования НК в КА (рис. 6.1) температура внутренней поверхности внешней оболочки НК имеет постоянную во времени величину θ_{gni} . Температура внешней оболочки влияет на температуру граней θ_{ggi} призмы (2.24) -(2.29). С противоположных сторон НК имеются прямоугольные области S1 и S2, на которые через открытые люки воздействует температура внешней среды θ_{sr_gg} . 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.

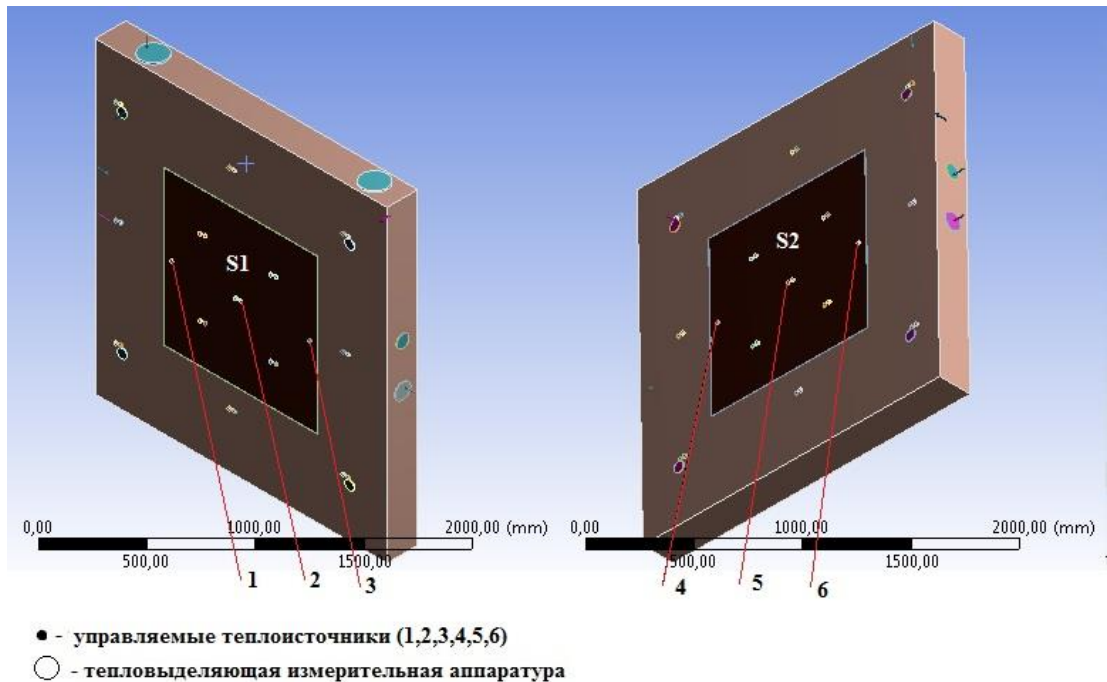


Рисунок 6.1 – Расположение теплоисточников на НК (пример)

Сформулируем задачу оптимального управления. Распределение температуры в НК ИИС (см. рис. 2.2 и рис. 6.1) из изотропного материала со сторонами R_1, R_2, R_3 для любой точки $M(x, y, z) \in \Omega_M$ области Ω_M описывается неоднородным дифференциальным уравнением теплопроводности (2.14) с однородными краевыми условиями (2.15).

Поставим задачу оптимального управления только теми УИТ, которые размещены в непосредственной близости от линии ответственного сечения $L^*(M^*) \in \Omega_M, M^* \in L^* \subset M$

с координатами $x \in [0, R_1]$; $y^* = 0.5R_2$; $z^* \in 0.5R_3$. Поэтому в стандартизирующей функции (2.17) $\omega(M, \varphi)$, приводящей с помощью функции Грина исходную неоднородную краевую задачу (2.8)-(2.13) к стандартной форме (2.14)-(2.16), запишем для наиболее значимых тепловыделяющих элементов ИИС N_α и УИТ из общего числа N (см. рис 2.2-2.6), соответствующие слагаемые в (2.22) и в (2.23) запишем в форме:

$$\sum_{i=1}^N q_{ti}(\tau) V_{ti}(x, y^*) = \sum_{i=1}^3 q_{ti}(\tau) V_{ti}(x, y^*) \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{tui}(\tau) V_{tui}(x, y^*) = \sum_{i=1}^3 q_{tui}(\tau) V_{tui}(x, y^*) \quad (6.3)$$

где значимые УИТ расположены по 3 на каждой грани gg1 и gg2 на линиях $y = 0.5R_2, z = 0$; $y = 0.5R_2, z \in 0.5R_3$, а остальные УИТ предполагаются источниками возмущающих воздействий, как и другие тепловыделяющие элементы ИИС (см. рис. 4.1 – рис. 4.3, рис 6.1). При этом линия $L^*(x)$ ответственного сечения проходит по середине НК $y = 0.5R_2, z \in 0.5R_3$, а координаты расположения значащих УИТ заданы функциями:

$$V_{ti}(x, y^*) = \delta_i(x - x_i) \Big|_{\substack{y^*=0.5R_2 \\ z=0}}; V_{tui}(x, y^*) = \delta_i(x - x_i) \Big|_{\substack{y^*=0.5R_2 \\ z=R_3}} \quad (6.4)$$

Таким образом, можно сформулировать задачи оптимального управления:

Определить оптимальный закон $U^{opt}(\tau) : (q_{ti}(\tau) : q_{tui}(\tau))$ изменения тепловых потоков

$$q_{ti}(\tau, x_i) \Big|_{\substack{z=0, y=0.5R_2 \\ x=x_i}}, \quad q_{tui}(\tau, x_i) \Big|_{\substack{z=R_3, y=0.5R_2 \\ x=x_i}}, \quad \text{в условиях ограничений по допустимой}$$

температуре $\theta_d = const$:

$$\theta(M, \tau) \leq \theta_d, \tau \in (0, \infty), M \in \Omega_M \subset D_x \cup D_y \cup D_z \quad (6.5)$$

и на ресурс управления (3.3) при воздействии на объект возмущений

$$J = J^{opt}(U_{opt}^{(\beta)}(\tau)) = \min_{U_{opt}^{(\beta)}(\tau) = U_{opt}^{(1)}(\tau)} J \quad J^{opt}(U_{opt}^{(\beta)}(\tau)) = J^{opt}(q_{x(opt)}^\beta, q_{y(opt)}^\beta, q_{z(opt)}^\beta) \text{ при заданном}$$

значении $\tau = \tau_k$ - задача максимальной точности ($\beta=1$) или $\min_{U_{opt}^{(\beta)}(\tau) = U_{opt}^{(2)}(\tau)} \tau(q_{x(opt)}^\beta, q_{y(opt)}^\beta, q_{z(opt)}^\beta)$ при

заданном значении $J = J_{доп}$ - задача быстродействия ($\beta=2$). В этой постановке задача принимает форму оптимальной минимаксной задачи:

$$J^{opt} = \min_{q_{ti}^{(1)}, q_{tui}^{(1)}} \max_x \left| \theta(M^*, \tau_k - \theta_{spec}) \right| \quad (6.6)$$

при бесконечном количестве ограничений вида (6.5) в модальном пространстве (3.10) трансформант (см. рис. 2.9) температуры $\theta(M, \tau)$ [70, 117].

В случае задачи быстродействия ($\beta=2$) $J^{opt} = \min_{q_{ii}^{(1)}, q_{iii}^{(1)}} \tau_k$ выражения (6.6)

трансформируется в бесконечное число ограничений вида:

$$\max_{x \in M^*} |\theta(M^*, \tau_k - \theta_{spec})| \leq \varepsilon_{don}. \quad (6.7)$$

Здесь управление осуществляется одновременно всеми 6-ю УИТ; $U^{(\beta)}(\tau) = (q_{i1}^{(\beta)}, q_{i2}^{(\beta)}, q_{i3}^{(\beta)}, q_{iii1}^{(\beta)}, q_{iii2}^{(\beta)}, q_{iii3}^{(\beta)})$ с фиксированным расположением в соответствии с (6.4)

6.2 Решение задачи оптимального управления распределением температуры в заданном сечении НК ИИС КА

Решение поставленной негладкой полубесконечной задачи оптимизации со свободным правым концом траектории в недифференцируемой области $\Omega_k : \{\theta(M^*, \tau) : \theta(M^*, \tau_k) \in \max_{x \in 0, R_1} |\theta(M^*, \tau_k) - \theta_{spec}| \leq \varepsilon^\alpha, \theta_{spec} = const, \alpha = const\}$ классическими методами является затруднительным.

Теоретические аспекты проблемы оптимального управления процессами теплообмена металла, в основном для среднеквадратичного критерия качества исследованы в работах [12, 13, 15-17, 26, 42, 73, 78]. Среди них следует выделить фундаментальные работы А.Т. Бутковского, А.И. Егорова, Ж.Л. Лионса, Т.К. Сиразетдинова [12, 15, 26, 42, 78], где для различных функционалов качества построены алгоритмы управления системами с распределенными параметрами, описываемыми как интегральными, так и дифференциальными уравнениями.

Определяющие результаты в области оптимального управления объектами с распределенными параметрами для негладкой области конечных состояний получены Э.Я. Рапопортом [24, 70]. Им обоснована необходимость отказа от жесткой фиксации в конечной точке процесса при постановке задач оптимального управления. от попыток обеспечения недостижимых областей Ω_k в ходе решения этих задач. Э.Я. Рапопортом предложен метод решения задач оптимального по быстродействию перевода объекта в заданную негладкую область конечных состояний – альтернансный метод. Этот метод широко применяется в задачах оптимизации процессов нагрева. В [24, 31, 41, 74] он

использовался для оптимизации как переходных, так и установившихся режимов работы индукционных УИТ непрерывного действия. А.А. Базаровым, Ю.Э. Плешивцевой [6, 63] альтернативный метод применялся при разработке НК индукционных нагревателей различных типов, а М.Ю. Лившицем [39] – для определения алгоритмов управления различными нелинейными процессами технологической теплофизики по системным критериям качества. Поэтому для решения задачи воспользуемся альтернативным методом.

Мультипликативная форма допустимого управления (6.2) и (6.3) с фиксированными заранее функциями $V_{ii}(x, y^*)$ и $V_{iui}(x, y^*)$ распределения значимых УИТ в соответствии с (6.5) позволяет в упрощенном случае синхронного управления интенсивностью всех 6 -ю симметрично расположенных УИТ $q_{ii}(\tau), q_{iui}(\tau), i = \overline{1, 3}$ отыскивать оптимальное для обеих задач управление $U_{onm}^{(\beta)}(\tau), \beta = 1, 2$

$$U_{onm}^{(1)}(\tau) = \arg \min_{U^{(1)}(\tau)} J; U_{onm}^{(2)}(\tau) = \arg \min_{U^{(2)}(\tau)} \tau_k \quad (6.8)$$

в задаче максимальной точности ($\beta=1$) и в задаче быстродействия ($\beta=2$) в параметрической форме. Эту форму можно получить с помощью метода моментов [10,11,15,69] свести обе задачи к проблеме поиска конечного числа параметров $\Delta_{\delta}^{(i)}$, $\delta=1,2,\dots,I; \alpha=1,2,\dots,J$; причем $\Delta_{\delta}^{(i)}$ продолжительность δ -го интервала постоянства значений интенсивности (мощности $P_i(\tau) = P_{\max}$ теплоисточников $q_{ii}(\tau) = q_{iui}(\tau) = q_{\max}$) из общего их количества α , на которых каждая компонента вектора $\bar{U}^{(\beta)}(\tau)$ попеременно принимает свои предельно возможные значения на уровне ограничений(3.3)

$$U_{onm}^{(\beta)}(\tau) = U_{onm}^{(\beta)}(\Delta^{(\alpha)}\delta) = \begin{cases} q_{\max i} = \frac{P_{\max i}}{s_t}, \forall i = \overline{1, 6}, \delta = 1, 3, 5... \\ 0, \forall i = \overline{1, 6}, \delta = 2, 4, 6... \end{cases} \quad (6.9)$$

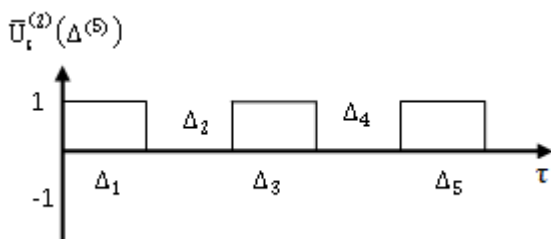


Рисунок 6.2. – Примерный вид компоненты $U_t^{(2)}(\Delta^{(5)})$, 5-и интервального оптимального управления ($\alpha=5$) в задаче быстродействия ($\beta=2$)

Продолжительность $\Delta_{\delta}^{(j)}$, $j = \overline{1, \alpha}$ требуемое количество интервалов α , определяется альтернансным методом [10,11,69] из системы трансцендентных уравнений [71]:

$$\theta(x_{\vartheta}, \tau_k) \Big|_{\substack{x_{\vartheta}=[0, R_1] \\ y=0,5R_2 \\ z=0,5R_3}} = \pm \varepsilon^{(\alpha)}; \frac{\partial \theta(x_{\vartheta}, \tau_k)}{\partial x} \Big|_{\substack{x_{\vartheta}=[0, R_1] \\ y=0,5R_2 \\ z=0,5R_3}} = 0 \quad (6.10)$$

где $\theta(x_{\vartheta}, \tau_k) = \theta(x, y, z, \tau) |_{x=x_{\vartheta}, y=0,5R_2, z=0,5R_3, \tau=\tau_k}$ результирующее решение краевой задачи (2.14) -(2.29) вида (3.8) с параметризованным оптимальным управлением (6.9), $x_{\vartheta} \in [0, R_1]$, $\vartheta = 1, 2, \dots, \alpha$ – счетное множество предельных точек из замкнутого множества, $[0, R_1] \bar{D}_k \bar{\subset} \bar{\Omega}_{\rho} \subset E^3$ области определения $M \in \{x: x \in [0, R_1], y: y \in [0, R_2], z: z \in [0, R_3]\} \bar{\Omega}_{\rho}$ функции $\theta(\rho_k, \varphi_k)$, в которых выполняются соотношения (6.10);

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

$\varepsilon_{\min}^{(\alpha)} = \max \left| \theta(\rho, \Delta^{(i)}, \varphi_k) \right|$ – предельно достижимое в ходе решения задачи максимальной точности ($\beta=1$) в классе α -интервальных управлений отклонение $T(x, y, z, \tau_k)$ от заданной величины θ_{spec} . $\varepsilon_{\text{don}}^{(\alpha)}$ -максимально допустимое заданное для решения задачи быстрогодействия ($\beta=2$) 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.

6.3 Численное решение задачи оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении

Процедура решения трансцендентной системы (6.10) выполняется специально разработанным пакетом прикладных программ [11] на основе численного решения краевой задачи (1) - (4) в пакете «ANSYS». Результаты для одно и двух интервального управления $\alpha=1, 2$ в рассматриваемом примере приведены на рисунках (рис. 6.3, рис. 6.4, рис. 6.5, рис. 6.6). На рисунках приведено результирующее температурное распределение для оптимального по точности управления $\beta=1$ для 1 и 2х интервального 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.

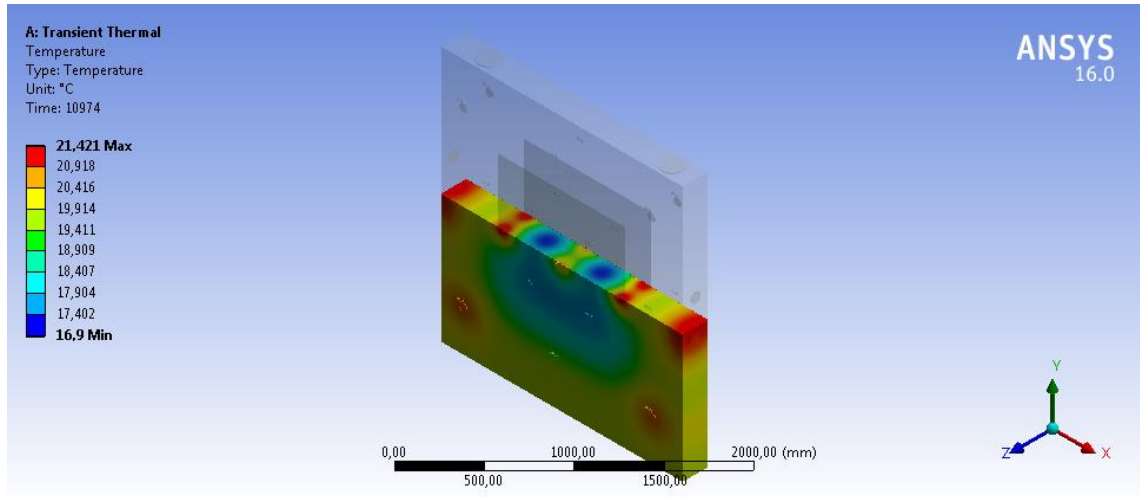


Рисунок 6.3 – Температурное поле НК после двуинтервального управления

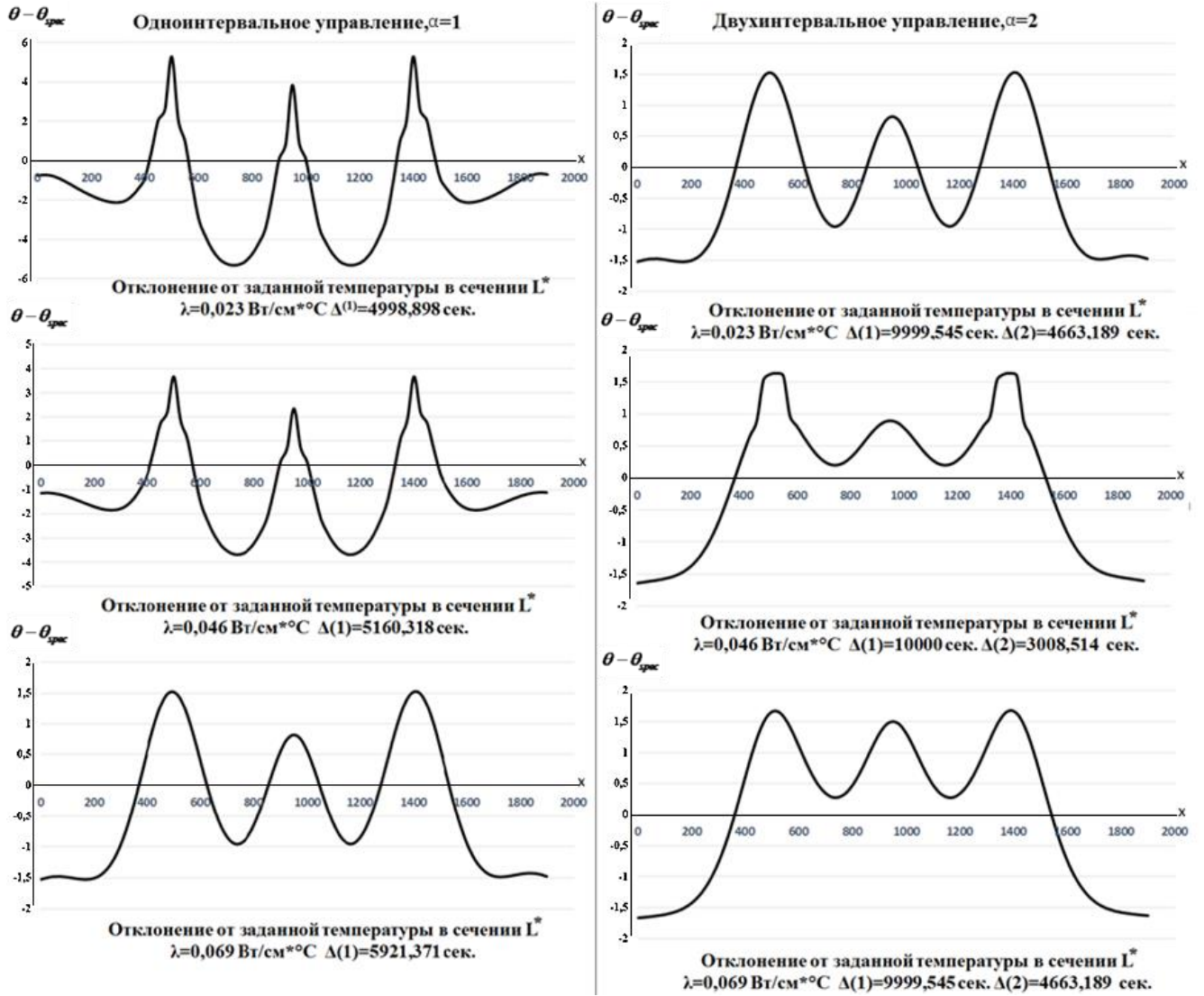


Рисунок 6.4 – Отклонение $\varepsilon_{\min}^{(\alpha)}$ от заданной температуры на линии сечения $L^*(x, y^*, z^*)$

$$y^* = 0,5R_2, \quad z^* = 0,5R_3 \text{ при оптимальном по точности управлении } (\beta = 1)$$

Зависимость результатов решения оптимальных задач от свойств материала конструкции- коэффициента теплопроводности λ представлена на рисунках 6.5 и 6.6.

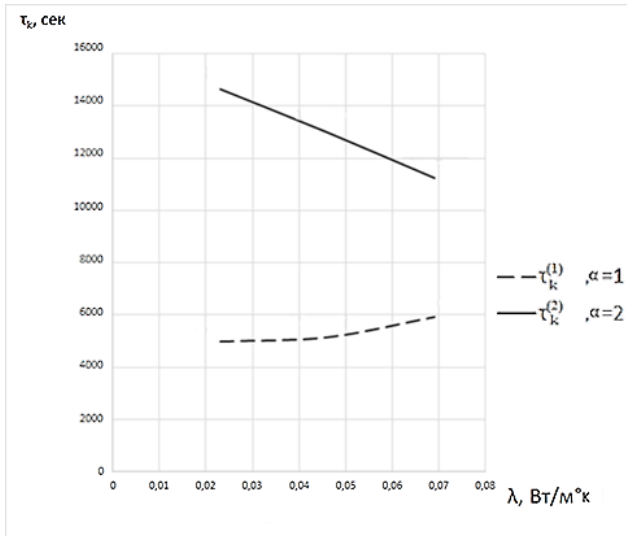


Рисунок 6.5 – Зависимость времени управления τ_k от коэффициента теплопроводности для одно- и двухинтервального ($\alpha=1$, $\alpha=2$) управления

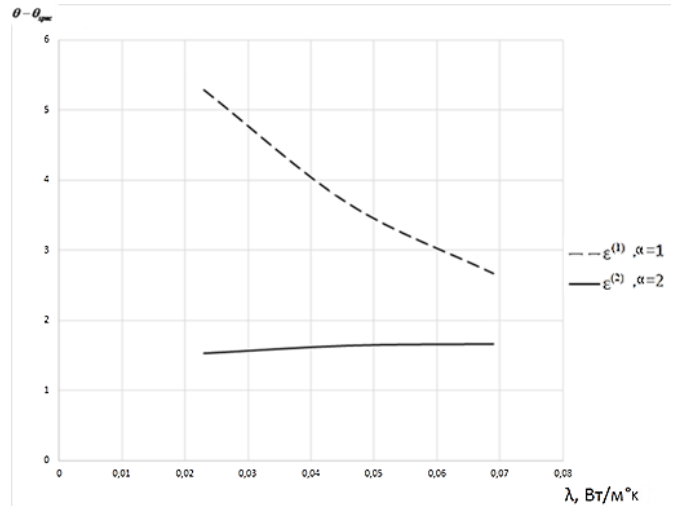


Рисунок 6.6 – Зависимость достижимой погрешности $\varepsilon_{\min}^{(\alpha)}$ управления от коэффициента теплопроводности для одно- и двухинтервального ($\alpha=1$, $\alpha=2$) управления

Полученные результаты 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 [10, 11]. Это обеспечивает конструктору большую свободу при выборе материала конструкции.

Предложенная процедура решения задач оптимального управления температурным распределением НК при конечно-элементной реализации ФОМ, свободной от допущений (см. раздел 2.2), в программной среде «ANSYS», позволяет получить результаты, моделирующие реализацию алгоритма бортовыми компьютерами автономных объектов различного назначения, снизить термодформационную составляющую измерительной погрешности, не увеличивая чрезмерно количество УИТ.

6.4 Выводы по шестой главе

1. Обоснована и поставлена задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении НК ИИС АО.
2. Предложена модификация численной процедуры альтернансного метода Э.Я. Рапопорта для группы дискретно распределенных управляемых теплоисточников.

3. Решена задача синхронно оптимального управления температурой НК ИИС АО группой дискретно распределенных управляемых теплоисточников.

4. Получены зависимости оптимального температурного распределения от теплофизических характеристик материала НК ИИС АО, позволяющих реализовать двухинтервальное оптимальное управление, как наименее чувствительное

5. Получены предельно допустимые в рассматриваемом классе оптимального управления кондиции температурного поля НК ИИС АО.

6. Погрешность не превышает $1,6^{\circ}\text{C}$ при двухинтервальном и $5,2^{\circ}\text{C}$ при одноинтервальном управлении от заданной температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная в диссертационном исследовании цель достигнута:

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. (2.2 К) и 0.51 ед. (3.4 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.

10. Результаты работы внедрены в расчетно-проектировочную практику на предприятиях АО «99 ЗАТО», АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» и в учебный процесс кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета.

11. Материалы диссертационного исследования могут быть использованы при моделировании, проектировании различных процессов технологической теплофизики, а также при создании САУ различной физической природы.

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АО – автономный объект;
- АТСТ – алгоритм автоматической термоградиентной стабилизации
- ИИС – информационно-измерительная система;
- ИС – измерительная система;
- КА – космический аппарат;
- ЛФЧХ – линейно функциональные частотные характеристики;
- ММ – математическая модель
- МКА – малый космический аппарат;
- НК – несущая конструкция;
- ОРП – объект с распределенными параметрами;
- ОС – оптическая система;
- ОСП – объект со сосредоточенными параметрами;
- ОУ – объект управления;
- ОЭК – оптико-электронные комплексы;
- ПИ – пропорционально – интегральная;
- ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальная;
- ПУТ – подсистема управления температурой;
- САУ – система автоматического управления;
- СОТР – системы обеспечения теплового режима;
- СРП – системами с распределенными параметрами;
- СТГС – средства термоградиентной стабилизации;
- СТР – системы терморегулирования;
- УИТ – управляемый источник тепла;
- УП – управляющая супервизорная программа;
- УУ – управляющее устройство;
- ФОМ – функционально ориентированная модель.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абен, Х.К. Интегральная фотоупругость / Х.К. Абен; – Таллин: Валгус, 1975. – 218 с.
2. Авдудевский, В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике/ В.С. Авдудевский, Б.М. Галицейский [и др.];–М.: Машиностроение, 1992.– 528 с.
3. Александров, А.Я. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела / А. Я. Александров, М.Х. Ахметзянов; – М.: Наука, 1973. – 576 с.
4. Алифанов, О.М. Обратные задачи в исследовании сложного теплообмена / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, А.В. Ненарокомов; – М.: Янус-К, 2009. – 300 с.
5. Алифанов, О.М. Регуляризационные схемы решения обратных задач теплопроводности / О. М. Алифанов // ИФЖ. – 1973. – Т. 24, № 2. – С. 324-333.
6. Базаров, А.А. Синтез замкнутой системы управления для объекта с распределенными параметрами / А.А. Базаров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2002. – № 16. – С. 212-215.
7. Баничук, Н.В. О форме движущейся в деформируемой среде осесимметричной жесткой оболочки, обладающей минимальной массой и наименьшей силой сопротивления / Н.В. Баничук, С.Ю. Иванова, Ф. Рагнедда, М. Сера // Проблемы прочности и пластичности. – 2011. –№73. – С. 36-44.
8. Блох, А. Г. Теплообмен излучением. Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков; – М.: Энергоатомиздат. –1991. – 432 с.
9. Болсуновский, М.А. Развитие систем ДЗЗ и информационно-аналитического обеспечения данными космической съемки: ближайшие перспективы / М.А. Болсуновский, Б.А. Дворкин // Геоматика. – 2010. - №4. - С. 11 – 16.
10. Бородулин, Б.Б. Алгоритм автоматической компенсации термодформаций теплонагруженных несущих конструкций / Б.Б. Бородулин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2021. - Т. 29. № 4 (72). - С. 6-19.
11. Бородулин, Б.Б., Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects / B.B. Borodulin, M.Y. Livshits, S.E. Korshikov // MATEC Web of Conferences. – 2017. Vol. 92. – P. 01053.
12. Бутковский, А.Г. Системы с подвижным воздействием - новый класс систем управления с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский, Е.П. Чубаров //

- Управление распределенными системами с подвижным воздействием. – М.: Наука, 1979. – С.3-8.
13. Бутковский, А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1975 - 586 с.
14. Бутковский, А.Г. Структурная теория распределенных систем / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1977. - 320 с.
15. Бутковский, А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1965. – 476 с.
16. Бутковский, А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла / А.Г. Бутковский. – М.: Metallurgy, 1972. –440 с.
17. Бутковский, А.Г. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский, Л.М. Пустыльников. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
18. Викулов, А.Г. Математическое моделирование теплообмена в космических аппаратах / Викулов, А.Г // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2017. – №2. – С. 61-78.
19. Викулов, А.Г. Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах / А.Г. Викулов, А.В. Ненарокомов // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, №1. – С. 32.
20. Волосов, Д.С. Теория термохроматических aberrаций и апохроматизм оптических систем / Д.С. Волосов // Труды ГОИ им. С. И. Вавилова.- 1980. - Т. 46. - № 180. - С. 23-36.
21. Волосов, Д.С. Фотографическая оптика / Волосов Д.С; – М.: Искусство, 1971. – 671с.
22. Герловин, Б.Я. Фотоэлектронное устройство для настройки оптической системы / Б.Я. Герловин, Е.Р. Маламед // Патент 2082193 РФ. – 1997.
23. Грамматин, А.П. Функция рассеяния точки в немнохроматическом свете для идеальной оптической системы / А.П. Грамматин, И.Л. Лукашова // Оптический журнал. – 1995. – Т. 62. – № 2. – С. 71-72.
24. Данилушкин, А.И. Оптимальное управление процессом индукционного непрерывного нагрева: автореферат диссертации ... кандидата технических наук: 05.09.10 / Данилушкин Александр Иванович, – Л., 1979. - 16 с.
25. Дульнев, Г.Н., Тарановский Н.Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Учебное пособие для вузов / Г. Н. Дульнев, Н. Н. Тарановский. – Ленинград.– 1971.- 248 с.
26. Егоров, А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами / А.И. Егоров; - М.: Наука, 1978. - 464 с.

27. Ефимов, А.П. Численные методы многопараметрической оптимизации процессов взаимодействия тепловых и электромагнитных полей / А.П. Ефимов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VIII Междунар. конф. – Самара: СНЦ РАН. – 2006. – С. 195-199.
28. Залетаев, В.М. Расчет теплообмена космического аппарата / В.М. Залетаев, Ю.В. Капинос, О.В.Сургучев; – М. Машиностроение. – 1979. – 208 с.
29. Зарубин, В.С. Математические модели термомеханики / В.С. Зарубин, Г.Н. Кувыркин; – М.: Физматлит. – 2002. – 168 с.
30. Золотой, С.А. Белорусская космическая система дистанционного зондирования Земли, современное состояние и перспективы развития / С.А. Золотой // Геоматика. – 2010. - №3(8). – С.31–33.
31. Казаков, А.А. Разработка и исследование алгоритмов и систем оптимального управления индукционным нагревом металла: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.13.14 / Казаков Анатолий Алексеевич, – Куйбышев, 1975. – 24 с.
32. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов; – М.: Высшая школа, 1985. – 485 с.
33. Клебанов, Я.М. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа / Я.М. Клебанов, А. В. Карсаков, С. Н. Хонина [и др.] // Компьютерная оптика. – 2017 – Т. 41, № 1. – С.30-36.
34. Климакова, Л.А. Размеростабильная оболочка / Л. А. Климакова, О.Н. Комиссар, А. О. Половый [и др.] // Патент 2373118 РФ. – 2006.
35. Кобранов, Г.П., Внешний теплообмен космических объектов / Г.П. Кобранов, А.П. Цветков, А. И. Белов, В.А.Сухнев; – М.Машиностроение, 1977. 104 с.
36. Козлов, Л.В. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Л.В. Козлов, М.Д. Нусинов, А.И.Акишин; – М.: Машиностроение. – 1971. – 380 с.
37. Космическая съемка Земли высокого и сверхвысокого разрешения [Электронный ресурс]: <https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/>
38. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов; – М.:Высшая школа, 1970. – 712 с.
39. Лившиц, М.Ю. Стабилизация температурного поля несущих конструкций автономных объектов / М.Ю. Лившиц, М.Ю. Дервянов, А.Н. Давыдов, С.А. Копытин //

- Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». – 2013. – Часть 2. – С. 47-51
40. Лившиц, М.Ю. Распределенное управление температурными режимами элементов конструкций автономных объектов / М.Ю. Лившиц, М.Ю. Деревянов, С.А. Копытин // Материалы XIV Минского международного форума по тепло- и массообмену / Минск. – 2012. – Т. 1. – Часть 1. – С. 719-722.
41. Лившиц, М.Ю. Термоградиентная размерная стабилизация ответственных сечений несущей конструкции автономного объекта / М.Ю. Лившиц, Ю.О. Савельева, И.Е. Адеянов, И.А. Данилушкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ, 2020. – Т.2. – С.79-87.
42. Лионс, Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / Лионс Ж.Л.; – М.: Мир, 1972. - 416 с.
43. Лыков, А.В. Теория теплопроводности: Учебное пособие для теплотехнических специальностей вузов / Лыков А.В. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
44. Маламед, Е.Р. Космический зеркально-линзовый телескоп / Е.Р. Маламед М.Н. Сокольский, А.И. Бакланов [и др.] // Патент 2115942 РФ. – 1999.
45. Малоземов, В.В. Тепловой режим космических аппаратов / В.В. Малоземов; – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
46. Малоземов, В.В., Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов / В.В. Малоземов, Н.С. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1988. – 134 с.
47. Маркина, М.В. Численные методы оптимального проектирования механических систем. Методическое пособие / М.В. Маркина. – Н.Новгород: изд-во ННГУ, 2011. - 25 с.
48. Маркина, М.В. Аппроксимация множества Парето в бикритериальных задачах оптимального проектирования механических конструкций / М.В. Маркина // Проблемы прочности и пластичности. – 2011. – Вып. 73. – С. 167-179.
49. Меснянкин, С. Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел / С. Ю. Меснянкин, А. Г. Викулов, Д. Г. Викулов // Успехи физических наук. - 2009. – Т. 179, № 9. – С. 945-970.
50. Мигай, В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В.К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 262 с.
51. Микрин, Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов: учебное пособие / Е.А.Микрин. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 245 с.

52. Митрофанова, О.В., Расчетное моделирование движения теплоносителя в сложных криволинейных каналах /Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш. // Тепловые процессы в технике, 2019. – Т. 11, № 5. – С. 194-202.
53. Мешков, В.Р. Моделирование линейной нестационарной теплопроводности с использованием асимптотических решений уравнения Гельмгольца / В.Р. Мешков // V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах»: Тезисы докладов. - СПб., 2001.- С. 100.
54. Мешков, В.Р. Об искажении траекторий лучей в оптических системах, вызываемом температурным фактором / В.Р. Мешков // Исследование и проектирование элементов НК космических аппаратов и двигательных установок: сборник статей. – СПб.: БГТУ, 1997. – С.92-99.
55. Мешков, В.Р. Способ расчета поля объемного тепловыделения в линзовых системах, обусловленного поглощением излучения видимого спектра // Исследование и проектирование элементов НК космических аппаратов и двигательных установок: сборник статей. – СПб.: БГТУ, 1997. - С. 85-92.
56. Мешков, В.Р. Управление тепловым режимом космического линзового телескопа / В.Р. Мешков // Международная научная конференция «Ракетно-космическая техника: фундаментальные проблемы механики и теплообмена»: тезисы докладов: Тезисы докладов. – М., МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998 – С. 112.
57. Мешков, В.Р. Хроматические термоабберации высокоточного линзового объектива / В.Р. Мешков // V Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах»: Тезисы докладов. – СПб., 2001. – С. 134.
58. Мешков, В.Р., Королев С.И. Влияние теплового режима высокоразрешающих оптических систем на качество изображения / В.Р. Мешков, С.И. Королев // Всероссийская молодежная научная конференция «XXIII гагаринские чтения»: Тезисы докладов. – М., 1997.- Часть 3.- С.83-84.
59. Мишин, В.П., Осин М.И. Введение в машинное проектирование летательных аппаратов / В.П. Мишин, М.И.Осин; - М.:Машиностроение, 1978. –128 с.
60. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / под ред. Г.И. Петрова. – М.:Машиностроение, 1974. – 379 с.

61. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учебник для авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.
62. Першин, И.М. Аппроксимационные модели передаточных функций распределенных объектов / И.М.Першин, Г.Е.Веселов, М.И. Першин // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 7 (168). – С. 126-138.
63. Плешивцева, Ю.Э., Параметрическая оптимизация температурного профиля нагреваемой заготовки перед прессованием / Ю.Э. Плешивцева, А.А. Афиногентов, С.Е. Коршиков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2010. № 1 (26). – С. 196-203
64. Полянин, А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А.Д. Полянин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
65. Прокопьев, А.П. Идентификация нелинейной системы управления с ПИД-регулятором / А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов // Труды X Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'15), М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015, С.387-397.
66. Рапопорт, Э.Я. Альтернативный метод в векторных задачах параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами / Э.Я. Рапопорт, Ю.Э. Плешивцева // Институт проблем управления сложными системами РАН. Журнал «Онтология проектирования». – Самара: Предприятие «Новая техника», 2018. – Т.8, №4(30). – С.615-627.
67. Рапопорт, Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
68. Рапопорт, Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. бакалавров и магистров "Автоматизация и упр." и направлению подгот. дипломир. специалистов "Автоматизация и упр." / Э.Я. Рапопорт; - М.: Высш.шк, 2005. – 292 с.
69. Рапопорт, Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 220201 "Управление и информатика в технических системах" / Сер. Для высших учебных заведений. Автоматика и управление. / Э.Я. Рапопорт; – М.: Высшая школа. 2009. – 677 с.

70. Рапопорт, Э.Я. Подвижное управление в задачах оптимизации индукционного нагрева металла / Э.Я. Рапопорт // Управление распределенными системами с подвижным воздействием. - М., 1979. - С. 82-99.
71. Рапопорт, Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Упр. и информатика в техн. системах" / Э.Я. Рапопорт – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.
72. Резник, С.В. Перспективы повышения размерной стабильности и весовой эффективности рефлекторов космических антенн из композиционных материалов / С.В. Резник, П.В. Просунцов, А.Д. Новиков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 1(694). – С. 71–83.
73. Рейн, У. Методы управления технологическими процессами / У.Рейн. - М.: Мир, 1983. – 368 с.
74. Рогачев, Г.Н. Совместная оптимизация конструктивных и режимных характеристик индукционно-тиристорного комплекса / Г.Н. Рогачев // Управления и оптимизации процессов технологического нагрева. - Куйбышев, 1986. - С. 144-149.
75. Ротац, В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротац. – М. «Энергия», 1973г. – 440с.
76. Ротац, В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.// В.Я. Ротац – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 400 с.
77. Савицкий, А.М. Влияние теплового режима на конструктивные характеристики космического телескопа / А.М. Савицкий // Оптический журнал. – 2009. – Т.76, №10. – С. 89-93.
78. Сиразетданов, Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами / Т.К. Сиразетданов. - М: Наука, 1977. – 480 с.
79. Смирнов, В.Н. Метод расчета температурных напряжений и перемещений в простых линзах / В.Н.Смирнов, Ю.П. Шрамко // Труды ГОИ им. С.И.Вавилова. – 1980. - Т.46. – Вып.2. – С. 110-114.
80. Современные проекты необитаемых автономных подводных аппаратов: разработки и перспективы [Электронный ресурс]: <https://integral-russia.ru/2023/06/16/sovremennye-proekty-neobitaemyh-avtonomnyh-podvodnyh-apparatov-razrabotki-i-perspektivy/>

81. Сокольский, М.Н. Допуски и качество оптического изображения» / М.Н. Сокольский. - Л: Машиностроение, 1989. – 221 с.
82. Фаворский, О.Н. Вопросы теплообмена в космосе / О.Н. Фаворский, Я.С. Каданер. - М.: Высшая школа, 1967. – 280 с.
83. Фельдбаум, А.А. Методы теории автоматического управления / А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 744 с.
84. Цаплин, С.В. Моделирование влияния тепловых факторов космического пространства на оптические характеристики линзового телескопа космического аппарата / С.В.Цаплин, С.А. Большев // Вестн. СамГУ Естественнонаучн. сер., 2013. – № 3(104). – С. 97-106.
85. Цаплин, С.В. Моделирование прецизионной системы управления температурными полями оптико-электронного телескопического комплекса космического аппарата. Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции, Махачкала, 8–10 декабря / С.В. Цаплин, С.А. Большев.- 2010 г. – С.120.
86. Цаплин, С.В., Система обеспечения теплового режима экспериментальной модели оптико-телескопического комплекса космического аппарата / С.В.Цаплин, С.А. Большев // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. 2013. № 9/2 (110). – С. 120–132.
87. Цаплин, С.В. Экспериментальные исследования макета оптико-телескопического комплекса космического аппарата при воздействии тепловых факторов космического пространства в лабораторных условиях / С.В.Цаплин, С.А.Большев, Б.С.Мишагин, Д.В. Шеманаев // Вестник СамГУ — Естественнонаучная серия. 2014. № 7(118) – С. 134-144.
88. Чёрный, И. Роль спутников ДЗЗ растёт / И.Чёрный // Новости космонавтики. - 2011, Т. 21. - №01(336). – С. 45.
89. Чупров, И.Ф. Уравнения параболического типа и некоторые методы их решения: учеб. пособие / И. Ф. Чупров, Е. А. Канева. – Ухта: УГТУ, 2012. – 103 с.
90. Шайда, А.Н., Силовой корпус космического телескопа / А.Н. Шайда, Н.Р. Стратилатов // Пат. 2448878 РФ. – заявлено 2010.11.09. Опубликовано: 2012.04.27
91. Шайда, А.Н., Стратилатов Н.Р., Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Максимов С.В. Силовая ферма космического телескопа / А.Н. Шайда, Н.Р. Стратилатов, А.Н.Кирилин,

Р.Н.Ахметов, С.В.Максимов // Пат. 2417389 РФ. – заявлено 2010.03.03. Опубликовано: 2011.04.27

92. Шрамко, Ю.П., Влияние градиентов температуры на качество изображения линзовых объективов / Ю.П.Шрамко, Е.Г. Нифонтова // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – Т. 57. – Вып. 1. – С. 25-28.

93. Щеверов Д.Н. Проектирование беспилотных летательных аппаратов / Д.Н. Щеверов - М.:Машиностроение, 1978. –264 с.

94. Эпоха автономных беспилотных автомобилей: проблемы и перспективы [Электронный ресурс]: <https://integral-russia.ru/2017/03/16/epoha-avtonomnyh-bespilotnyh-avtomobilej-problemy-i-perspektivy/>

95. ANSYS 5.7 Thermal Analysis Guide. Решение задач теплообмена. Перевод В.П. Югова, CADFEM 2001. – 108 с.

96. Baun, K.B. Apparatus and methods for focusing and collimating telescopes / K.B. Baun, B.Tingey, G.Ej-Khatib // Patent 7277233 USA. – 2007.

97. Chapman, H.N. Deformable mirror for short wavelength applications / H.N. Chapman, D.W. Sweeney // Patent 5986795 USA. – 1999.

98. Chen, Z. The thermo-optical design and experiment research on H α and white light telescope / Z.Chen, M. Wu, S. Gu X. et al. // Proceedings of the Conference «Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave». - 2010. – Vol. 7731. – 10 p.

99. Cullimore, B. Automated multidisciplinary optimization of a space-based telescope / B. Cullimore, T. Panczak, J. Baumann et al. // Proceedings of of International Conference On Environmental Systems, Society of Automotive Engineers, SAE 2002-01-2445. – P. 228-296.

100. Devilliers, C., Device for correcting optical defects of a telescope mirror / C. Devilliers, T. Lasic // Patent Application 2010/077414 USA. – 2010.

101. Doyle, K. Design optimization of system level adaptive optical performance / K. Doyle, V. Genberg, G. Michels et al. // Proceedings of SPIE Conference. – 2005. - Vol. 5867. – P.8.

102. Doyle, K. Optical modeling of finite element surface displacements using commercial software / K. Doyle, V. Genberg, G. Michels et al. // Proceedings of SPIE Conference. – 2005. - Vol. 5867. – P.12.

103. Genberg, V. Optimal design of lightweight mirrors / V. Genberg, N. Cormany // Proceedings of SPIE. Vol. 1997. - No. 7. - 1993. - P. 60–71.

104. Genberg, V. Opto-Mechanical I/F for ANSYS / V. Genberg, G.Michels // Canonsburg, PA: ANSYS Inc. - 2004. – P.13.
105. Genberg, V. Making mechanical FEA results useful in optical design / V.Genberg, G.Michels, K.Doyle // SPIE Paper 4769-4. - 2002.
106. Genberg, V.L., Integrating MD NASTRAN with optical performance analysis / V.L. Genberg, G.J. Michels // MSC Software Users Conference. - 2011.
107. Genberg, V. Optomechanical tolerancing with Monte Carlo techniques / V.Genberg, G.Michels, G.Bisson // Proceedings of SPIE, «Optomechanics 2011: Innovations and Solutions». 2011. - Vol. 8125.- P.9.
108. Gullapalli, S.N. Incremental switched deformable mirror / S.N. Gullapalli // Patent 6424076 USA. – 2002.
109. Li, L. Thermal Effects for Optical System and Design of an Analysis Program / L. Li, X. Wang, L. Zhang // Journal of Beijing Institute of Technology. – 2000. - Vol.20. - N 1. – P. 112-114.
110. Livshits, M.Y. Optimization of temperature distributions in critical cross-sections of load-bearing structures of measurement optical systems of autonomous objects / M.Y. Livshits, B.B. Borodulin, S.E. Korshikov // MATEC Web of Conferences. - 2017. – P.1053.
111. Martynenko, O.G. Free-convective heat transfer with many photographs of flows and heat exchange / O. G. Martynenko, P. P. Khramtsov // Berlin: Springer. - 2005. – P.516.
112. Meshkov, V.R. Design of the high-precision thermal-control system of a space vehicle with a lens telescope / V.R. Meshkov // Proceedings of the International Symposium on Space Technology. – 2000.
113. Michels, G. Opto-mechanical analysis and design tool for adaptive X-ray optics / G. Michels, V. Genberg // Proceedings of SPIE Conference «Optical Modeling and Performance Predictions IV». - 2009. - Vol. 7427 – P.11.
114. Michels G.J. Advances in the analysis and design of adaptive optics OSA Optics and Photonics Congress “Adaptive Optics: Methods, Analysis and Applications (AO), Toronto, ON, July, 2011.
115. Michels, G.J. Using the DRESP3 to improve multidisciplinary optimization / G.J. Michels, V.L. Genberg // MSC Software Users Conference. - 2011.

116. Michels, G.J. Integrating ANSYS mechanical analysis with optical performance analysis using SigFit / G.J. Michels, V.L. Genberg, K.B. Doyle // Proceedings of ANSYS Conference & 26th CADFEM User's Meeting. - 2008. – P.10.
117. Persa, G.C. Temperature compensating focuser for telescope / G.C. Persa // Patent 6327081 USA. – 2001.
118. Ranalli, E.R. Wavelength selective switch / E.R. Ranalli, B.A. Scott // Patent 6285500 USA. – 2001.
119. Schubert, H. Mirror telescope / H. Schubert, H.-J. Juranek // Patent 5138484 USA. – 1992.
120. Sea Technology, 1985, V.26, № I, P. 60-62; 1990, V. 31, № 5, P. 65, 67, 69, 71, 73.
121. Slusher, R.B. Motion reducing flexure structure / R.B. Slusher // Patent 5969892 USA. – 1999.
122. Solomon, M.B. Method and apparatus for controlling a deformable mirror / M.B. Solomon // Patent. 7203552 USA. – 2007.
123. The Space Report 2011. – Space Foundation. – 2011. – P.164.
124. The Space Report 2012. – Space Foundation. – 2012. – P.172.
125. URL: <http://www.3ds.com/products/simulia/portfolio/>
126. URL: <http://www.ansys.com>
127. URL: <http://www.dynardo.de/en/home.html>
128. URL: http://www.edstechnologies.com/Mailer/dec08/Tech-Isight_for_Abaqus.pdf
129. URL: http://www.esteco.com/home/mode_frontier/mode_frontier.html
130. URL: <http://www.iosotech.com>
131. URL: <http://www.mscsoftware.com>
132. URL: <http://www.radiantzemax.com>
133. URL: <http://www.simulia.com>
134. URL: <http://www.synopsys.com>
135. URL: http://www.cadfem.in/fileadmin/software/optislang/oS_ANSYS_WB.pdf
136. Xinmin, G. An algorithm of separating rigid body linear displacement from FEA data of optical systems / G. Xinmin, K. Weimin, Z. Jie // Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE. – 2011. – P.5.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П1 - Постоянные времени

T_{x1}, c	2,71	T_{y1}, c	555,79	T_{z1}, c	466,63
T_{x2}, c	0,68	T_{y2}, c	138,95	T_{z2}, c	116,66
T_{x3}, c	0,30	T_{y3}, c	61,75	T_{z3}, c	51,85

Таблица П2 – Коэффициенты K_x, K_y, K_z воздействия УИТ на точки измерения температуры

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
t1-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	884.734	389.479
2	1.359	97.344	4.920
3	0.599	3.317	75.008
t1-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	876.548	441.892
2	1.359	92.523	0.306
3	-0.599	2.241	59.624
t1-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	936.644	-485.498
2	1.359	128.957	-3.975
3	0.599	10.836	-39.529
t1-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	884.734	-390.235
2	1.359	97.344	4.857
3	-0.599	3.317	-74.849
t1-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	325.216	-444.776
2	1.359	-129.013	0.035
3	0.599	-16.990	-58.508
t1-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	366.107	-365.939
2	1.359	-119.561	6.803
3	-0.599	-18.271	-79.085

ВХОД - ВЫХОД	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
t1-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	365.098	364.322
2	1.359	-119.807	6.928
3	0.599	-18.243	79.305
t1-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	325.216	444.066
2	1.359	-129.013	0.102
3	-0.599	-16.990	58.785
t1-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-184.608	216.202
2	1.359	-152.981	16.033
3	0.599	10.739	71.661
t1-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-175.879	289.929
2	1.359	-154.033	12.082
3	-0.599	10.277	81.783
t1-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-182.089	-294.771
2	1.359	-153.290	11.782
3	0.599	10.606	-82.044
t1-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-208.539	-219.242
2	1.359	-149.835	15.893
3	-0.599	11.969	-72.285
t2-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	936.812	-416.423
2	1.359	129.087	-2.225
3	0.599	10.917	-62.466
t2-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	928.238	-472.528
2	1.359	122.763	-0.138
3	-0.599	7.414	-49.646
t2-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	991.776	519.158
2	1.359	171.006	1.796
3	0.599	35.661	32.914
t2-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	936.812	417.290
2	1.359	129.087	-2.194
3	-0.599	10.917	62.324
t2-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	344.356	475.613
2	1.359	-171.075	-0.016
3	0.599	-55.910	48.717
t2-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	387.655	391.310
2	1.359	-158.542	-3.073
3	-0.599	-60.124	65.851
t2-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	386.586	-389.580
2	1.359	-158.869	-3.130
3	0.599	-60.031	-66.034
t2-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	344.356	-474.854
2	1.359	-171.075	-0.046
3	-0.599	-55.910	-48.948
t2-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-195.473	-231.191
2	1.359	-202.859	-7.244
3	0.599	35.339	-59.669
t2-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-186.230	-310.030
2	1.359	-204.254	-5.458
3	-0.599	33.819	-68.097
t2-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-192.806	315.208

ВХОД - ВЫХОД	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
2	1.359	-203.268	-5.323
3	0.599	34.903	68.315
t2-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-220.813	234.443
2	1.359	-198.687	-7.180
3	-0.599	39.386	60.189
t3-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	324.811	-376.341
2	1.359	-129.276	8.217
3	0.599	-17.113	-79.888
t3-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	321.838	-427.045
2	1.359	-122.943	0.511
3	-0.599	-11.622	-63.493
t3-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	343.868	469.187
2	1.359	-171.257	-6.633
3	0.599	-55.898	42.094
t3-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	324.811	377.124
2	1.359	-129.276	8.105
3	-0.599	-17.113	79.706
t3-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	119.395	429.833
2	1.359	171.326	0.059
3	0.599	87.639	62.305
t3-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	134.407	353.645
2	1.359	158.774	11.351
3	-0.599	94.243	84.217
t3-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	134.037	-352.082
2	1.359	159.102	11.560

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	0.599	94.098	-84.451
t3-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	119.395	-429.147
2	1.359	171.326	0.170
3	-0.599	87.639	-62.600
t3-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-67.774	-208.938
2	1.359	203.156	26.752
3	0.599	-55.394	-76.311
t3-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-64.569	-280.188
2	1.359	204.553	20.159
3	-0.599	-53.011	-87.090
t3-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-66.849	284.868
2	1.359	203.566	19.659
3	0.599	-54.710	87.369
t3-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-76.560	211.876
2	1.359	198.979	26.518
3	-0.599	-61.738	76.976
t4-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	364.198	368.608
2	1.359	-120.195	10.110
3	0.599	-18.365	82.407
t4-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	360.865	418.271
2	1.359	-114.307	0.628
3	-0.599	-12.472	65.495
t4-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	385.566	-459.547
2	1.359	-159.227	-8.162
3	0.599	-59.986	-43.421

ВХОД - ВЫХОД	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
t4-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	364.198	-369.376
2	1.359	-120.195	9.972
3	-0.599	-18.365	-82.220
t4-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	133.873	-421.002
2	1.359	159.292	0.072
3	0.599	94.049	-64.269
t4-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	150.706	-346.379
2	1.359	147.621	13.966
3	-0.599	101.136	-86.873
t4-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	150.290	344.848
2	1.359	147.926	14.223
3	0.599	100.980	87.114
t4-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	133.873	420.330
2	1.359	159.292	0.210
3	-0.599	94.049	64.574
t4-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-75.993	204.645
2	1.359	188.886	32.915
3	0.599	-59.445	78.718
t4-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-72.399	274.431
2	1.359	190.185	24.803
3	-0.599	-56.888	89.837
t4-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-74.956	-279.015
2	1.359	189.267	24.188
3	0.599	-58.711	-90.124
t4-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z

ВХОД - ВЫХОД	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-85.844	-207.523
2	1.359	185.002	32.627
3	-0.599	-66.253	-79.403
t5-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-195.057	240.428
2	1.359	-151.848	35.765
3	0.599	11.373	90.532
t5-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-193.272	272.821
2	1.359	-144.409	2.224
3	-0.599	7.724	71.953
t5-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-206.502	-299.743
2	1.359	-201.158	-28.873
3	0.599	37.149	-47.703
t5-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-195.057	-240.928
2	1.359	-151.848	35.279
3	-0.599	11.373	-90.327
t5-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-71.700	-274.602
2	1.359	201.240	0.257
3	0.599	-58.244	-70.606
t5-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-80.715	-225.928
2	1.359	186.496	49.406
3	-0.599	-62.634	-95.438
t5-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-80.492	224.929
2	1.359	186.881	50.315
3	0.599	-62.537	95.703
t5-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-71.700	274.163

ВХОД - ВЫХОД	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
2	1.359	201.240	0.742
3	-0.599	-58.244	70.941
t5-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	40.700	133.481
2	1.359	238.627	116.437
3	0.599	36.814	86.479
t5-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	38.775	179.000
2	1.359	240.269	87.742
3	-0.599	35.230	98.694
t5-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	40.145	-181.990
2	1.359	239.109	85.565
3	0.599	36.360	-99.010
t5-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	45.976	-135.359
2	1.359	233.720	115.419
3	-0.599	41.030	-87.232
t6-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-182.259	-229.501
2	1.359	-153.464	37.452
3	0.599	10.700	-88.727
t6-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-180.591	-260.422
2	1.359	-145.946	2.329
3	-0.599	7.267	-70.518
t6-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-192.952	286.120
2	1.359	-203.299	-30.235
3	0.599	34.951	46.751
t6-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-182.259	229.979
2	1.359	-153.464	36.943

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	-0.599	10.700	88.525
t6-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-66.995	262.122
2	1.359	203.382	0.269
3	0.599	-54.798	69.198
t6-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-75.419	215.660
2	1.359	188.481	51.737
3	-0.599	-58.928	93.535
t6-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-75.211	-214.707
2	1.359	188.870	52.689
3	0.599	-58.837	-93.795
t6-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-66.995	-261.703
2	1.359	203.382	0.777
3	-0.599	-54.798	-69.526
t6-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	38.029	-127.415
2	1.359	241.167	121.931
3	0.599	34.636	-84.755
t6-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	36.231	-170.865
2	1.359	242.825	91.882
3	-0.599	33.146	-96.726
t6-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	37.511	173.719
2	1.359	241.654	89.602
3	0.599	34.208	97.036
t6-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	42.959	129.207
2	1.359	236.208	120.865
3	-0.599	38.603	85.492

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
tu1-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	876.749	368.608
2	1.359	92.638	10.110
3	-0.599	2.259	82.407
tu1-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	868.725	418.271
2	1,36	88.099	0.628
3	0.6	1.534	65.495
tu1-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	928.189	-459.547
2	1.359	122.721	-8.162
3	-0.599	7.380	-43.421
tu1-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	876.749	-369.376
2	1,36	92.638	9.972
3	0.6	2.259	-82.220
tu1-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	322.278	-421.002
2	1.359	-122.770	0.072
3	-0.599	-11.570	-64.269
tu1-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	362.801	-346.379
2	1,36	-113.776	13.966
3	0.6	-12.442	-86.873
tu1-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	361.800	344.848
2	1.359	-114.010	14.223
3	-0.599	-12.423	87.114
tu1-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	322.278	420.330
2	1,36	-122.770	0.210
3	0.6	-11.570	64.574
tu1-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-182.941	204.645
2	1.359	-145.579	32.915
3	-0.599	7.313	78.718
tu1-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-174.290	274.431
2	1,36	-146.580	24.803
3	0.6	6.998	89.837
tu1-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-180.444	-279.015
2	1.359	-145.873	24.188
3	-0.599	7.223	-90.124
tu1-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-206.655	-207.523
2	1,36	-142.586	32.627
3	0.6	8.151	-79.403
tu2-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	884.740	-396.836
2	1.359	97.348	3.009
3	-0.599	3.317	-71.915
tu2-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	876.643	-450.302
2	1,36	92.579	0.187
3	0.6	2.253	-57.157
tu2-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	936.649	494.738
2	1.359	128.960	-2.429
3	-0.599	10.837	37.893
tu2-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	884.740	397.662
2	1,36	97.348	2.968
3	0.6	3.317	71.752
tu2-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	325.216	453.241
2	1.359	-129.013	0.021

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	-0.599	-16.990	56.087
tu2-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	366.107	372.904
2	1,36	-119.561	4.157
3	0.6	-18.271	75.813
tu2-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	365.098	-371.255
2	1.359	-119.807	4.234
3	-0.599	-18.243	-76.023
tu2-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	325.216	-452.517
2	1,36	-129.013	0.062
3	0.6	-16.990	-56.353
tu2-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-184.608	-220.317
2	1.359	-152.981	9.798
3	-0.599	10.739	-68.696
tu2-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-175.879	-295.446
2	1,36	-154.033	7.384
3	0.6	10.277	-78.399
tu2-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-182.089	300.381
2	1.359	-153.290	7.200
3	-0.599	10.606	78.650
tu2-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-208.539	223.415
2	1,36	-149.835	9.713
3	0.6	11.969	69.294
tu3-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	360.153	-372.137
2	1.359	-121.176	9.251
3	-0.599	-18.249	-81.290

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
tu3-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	356.856	-422.275
2	1,36	-115.240	0.575
3	0.6	-12.394	-64.607
tu3-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	381.283	463.946
2	1.359	-160.526	-7.468
3	-0.599	-59.607	42.833
tu3-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	360.153	372.912
2	1,36	-121.176	9.125
3	0.6	-18.249	81.105
tu3-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	132.386	425.032
2	1.359	160.591	0.066
3	-0.599	93.454	63.398
tu3-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	149.032	349.695
2	1,36	148.825	12.779
3	0.6	100.497	85.695
tu3-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	148.621	-348.149
2	1.359	149.133	13.014
3	-0.599	100.342	-85.933
tu3-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	132.386	-424.353
2	1,36	160.591	0.192
3	0.6	93.454	-63.699
tu3-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-75.148	-206.604
2	1.359	190.427	30.118
3	-0.599	-59.069	-77.651
tu3-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-71.595	-277.058
2	1,36	191.736	22.696
3	0.6	-56.528	-88.619
tu3-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-74.123	281.686
2	1.359	190.811	22.133
3	-0.599	-58.340	88.902
tu3-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-84.890	209.510
2	1,36	186.511	29.855
3	0.6	-65.834	78.327
tu4-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	319.331	373.543
2	1.359	-130.457	8.906
3	-0.599	-16.918	80.830
tu4-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	316.409	423.870
2	1,36	-124.066	0.553
3	0.6	-11.490	64.242
tu4-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	338.067	-465.698
2	1.359	-172.822	-7.190
3	-0.599	-55.262	-42.590
tu4-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	319.331	-374.320
2	1,36	-130.457	8.785
3	0.6	-16.918	-80.646
tu4-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	117.381	-426.637
2	1.359	172.892	0.064
3	-0.599	86.642	-63.039
tu4-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	132.140	-351.016
2	1,36	160.225	12.304

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	0.6	93.171	-85.210
tu4-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	131.775	349.464
2	1.359	160.556	12.530
3	-0.599	93.027	85.447
tu4-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	117.381	425.956
2	1,36	172.892	0.185
3	0.6	86.642	63.338
tu4-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-66.631	207.385
2	1.359	205.012	28.997
3	-0.599	-54.763	77.211
tu4-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-63.480	278.105
2	1,36	206.422	21.851
3	0.6	-52.407	88.117
tu4-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-65.722	-282.750
2	1.359	205.426	21.309
3	-0.599	-54.087	-88.399
tu4-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-75.268	-210.301
2	1,36	200.797	28.743
3	0.6	-61.035	-77.883
tu5-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-175.135	224.171
2	1.359	-154.316	38.247
3	-0.599	10.319	87.728
tu5-pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-173.532	254.373
2	1,36	-146.756	2.378
3	0.6	7.008	69.725

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
tu5-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-185.410	-279.475
2	1.359	-204.428	-30.877
3	-0.599	33.707	-46.225
tu5-pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-175.135	-224.637
2	1,36	-154.316	37.727
3	0.6	10.319	-87.529
tu5-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-64.376	-256.034
2	1.359	204.511	0.275
3	-0.599	-52.847	-68.420
tu5-pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-72.471	-210.652
2	1,36	189.527	52.835
3	0.6	-56.829	-92.483
tu5-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-72.271	209.720
2	1.359	189.918	53.806
3	-0.599	-56.742	92.740
tu5-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-64.376	255.625
2	1,36	204.511	0.794
3	0.6	-52.847	68.744
tu5-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	36.543	124.456
2	1.359	242.506	124.518
3	-0.599	33.403	83.801
tu5-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	34.815	166.896
2	1,36	244.173	93.832
3	0.6	31.966	95.638
tu5-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	36.044	-169.684
2	1.359	242.995	91.503
3	-0.599	32.990	-95.944
tu5-пу6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	41.280	-126.206
2	1,36	237.519	123.429
3	0.6	37.228	-84.530
tu6-p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-209.238	-243.768
2	1.359	-149.929	35.233
3	-0.599	12.100	-91.017
tu6-пу1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-207.323	-276.611
2	1,36	-142.585	2.191
3	0.6	8.218	-72.339
tu6-p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-221.515	303.908
2	1.359	-198.617	-28.444
3	-0.599	39.524	47.958
tu6-пу2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-209.238	244.276
2	1,36	-149.929	34.754
3	0.6	12.100	90.811
tu6-p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-76.912	278.417
2	1.359	198.698	0.253
3	-0.599	-61.967	70.984
tu6-пу3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-86.583	229.068
2	1,36	184.140	48.672
3	0.6	-66.637	95.950
tu6-p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-86.344	-228.055
2	1.359	184.520	49.567

Вход - выход	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	-0.599	-66.534	-96.216
tu6-pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-76.912	-277.973
2	1,36	198.698	0.731
3	0.6	-61.967	-71.321
tu6-p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	43.659	-135.336
2	1.359	235.613	114.707
3	-0.599	39.167	-86.943
tu6-pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	41.594	-181.487
2	1,36	237.233	86.438
3	0.6	37.482	-99.223
tu6-p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	43.063	184.518
2	1.359	236.088	84.293
3	-0.599	38.684	99.540
tu6-pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	49.319	137.239
2	1,36	230.768	113.704
3	0.6	43.653	87.699

Таблица ПЗ – Воздействие от УИТ на грань 1

грань 1(x=0)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-1.081	-0.576
2	1.359	-0.179	0.054
3	-0.599	-0.022	0.024
pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-1.071	-0.654
2	1,36	-0.170	0.003
3	0,60	-0.015	0.001
p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-1.145	0.719

грань 1(x=0)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
2	1.359	-0.237	-0.044
3	-0.599	-0.072	-0.019
pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-1.081	0.578
2	1,36	-0.179	0.053
3	0,60	-0.022	0.023
p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-0.397	0.658
2	1.359	0.237	0.0003
3	-0.599	0.113	0.0001
pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-0.447	0.542
2	1,36	0.220	0.075
3	0,60	0.122	0.033
p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-0.446	-0.539
2	1.359	0.220	0.076
3	-0.599	0.121	0.034
pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	-0.397	-0.657
2	1,36	0.237	0.001
3	0,60	0.113	0.0005
p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	0.225	-0.320
2	1.359	0.282	0.178
3	-0.599	-0.071	0.079
pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	0.215	-0.429
2	1,36	0.283	0.134
3	0,60	-0.068	0.059
p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	0.222	0.436
2	1.359	0.282	0.130
3	-0.599	-0.070	0.058

грань 1(x=0)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
руб	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5,42	0,254	0,324
2	1,36	0,276	0,176
3	0,60	-0,079	0,078

Таблица П4 – Воздействие от УИТ на грань 2

грань 2(x=R=0.15)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-1.081	-0.576
2	1.359	-0.179	0.054
3	0.599	-0.022	0.024
pu1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-1.071	-0.654
2	1.359	-0.170	0.003
3	-0.599	-0.015	0.001
p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-1.145	0.719
2	1.359	-0.237	-0.044
3	0.599	-0.072	-0.019
pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-1.081	0.578
2	1.359	-0.179	0.053
3	-0.599	-0.022	0.023
p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-0.397	0.658
2	1.359	0.237	0.0003
3	0.599	0.113	0.0001
pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-0.447	0.542
2	1.359	0.220	0.075
3	-0.599	0.122	0.033
p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	-0.446	-0.539
2	1.359	0.220	0.076

грань 2($x=R=0.15$)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	0.599	0.121	0.034
ру4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	-0.397	-0.657
2	1.359	0.237	0.001
3	-0.599	0.113	0.0005
р5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	0.225	-0.320
2	1.359	0.282	0.178
3	0.599	-0.071	0.079
ру5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	0.215	-0.429
2	1.359	0.283	0.134
3	-0.599	-0.068	0.059
р6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	5.419	0.222	0.436
2	1.359	0.282	0.130
3	0.599	-0.070	0.058
ру6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-5.419	0.254	0.324
2	1.359	0.276	0.176
3	-0.599	-0.079	0.078

Таблица П5 – Воздействие от УИТ на грань 3

грань 3($z=0$)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
р1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-1.081	-577.3001
2	-0.0001	-0.179	-54.761
3	-0.00004	-0.022	94.258
ру1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-1.071	-655.0801
2	-0.0001	-0.1706	-3.405
3	0.00004	-0.015	74.914
р2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-1.145	719.723

грань 3(z=0)	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
2	-0.0001	-0.237	44.209
3	-0.00004	-0.072	-49.666
pu2	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	0.0004	-1.081	578.502
2	-0.0001	-0.179	-54.017
3	0.00004	-0.022	-94.044
p3	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	-0.0004	-0.397	659.356
2	-0.0001	0.237	-0.394
3	-0.00004	0.113	-73.512
pu3	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	0.0004	-0.447	542.485
2	-0.0001	0.2204	-75.648
3	0.00004	0.122	-99.366
p4	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	-0.0004	-0.446	-540.086
2	-0.0001	0.2208	-77.039
3	-0.00004	0.121	99.643
pu4	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	0.0004	-0.397	-658.303
2	-0.0001	0.237	-1.137
3	0.00004	0.113	73.861
p5	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	-0.0004	0.225	-320.507
2	-0.0001	0.282	-178.283
3	-0.00004	-0.071	90.039
pu5	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	0.0004	0.215	-429.803
2	-0.0001	0.283	-134.346
3	0.00004	-0.068	102.756
p6	Kx, ξ_x	Ky, ξ_y	Kz, ξ_z
1	-0.0004	0.222	436.982
2	-0.0001	0.282	-131.013
3	-0.00004	-0.0708	-103.085

грань 3(z=0)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
руб	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	0.254	325.015
2	-0.0001	0.276	-176.724
3	0.00004	-0.079	-90.822

Таблица Пб – Воздействие от УИТ на грань 4

грань 4(z=R=1.97)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
p1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-1.081	577.299
2	-0.0001	-0.179	-54.761
3	-0.00004	-0.022	-94.257
ру1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-1.071	655.079
2	-0.0001	-0.1706	-3.405
3	0.00004	-0.015	-74.914
p2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-1.145	-719.722
2	-0.0001	-0.237	44.208
3	-0.00004	-0.072	49.665
ру2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-1.081	-578.501
2	-0.0001	-0.179	-54.017
3	0.00004	-0.022	94.043
p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-0.397	-659.355
2	-0.0001	0.237	-0.394
3	-0.00004	0.113	73.511
ру3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-0.447	-542.484
2	-0.0001	0.2204	-75.648
3	0.00004	0.122	99.365
p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-0.446	540.086
2	-0.0001	0.2208	-77.039

грань 4(z=R=1.97)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	-0.00004	0.121	-99.641
ру4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-0.397	658.302
2	-0.0001	0.237	-1.137
3	0.00004	0.113	-73.8604
р5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	0.225	320.507
2	-0.0001	0.282	-178.282
3	-0.00004	-0.071	-90.038
ру5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	0.215	429.803
2	-0.0001	0.283	-134.346
3	0.00004	-0.068	-102.755
р6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	0.222	-436.981
2	-0.0001	0.282	-131.012
3	-0.00004	-0.0708	103.084
ру6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	0.254	-325.014
2	-0.0001	0.276	-176.723
3	0.00004	-0.079	90.821

Таблица П7 – Воздействие от УИТ на грань 5

грань 5(y=R=2.15)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
р1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	991.807	-0.576
2	-0.0001	164.578	0.054
3	-0.00004	20.325	0.024
ру1	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	982.7306	-0.654
2	-0.0001	156.516	0.003
3	0.00004	13.803	0.001
р2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	1049.998	0.719
2	-0.0001	218.023	-0.044

грань 5(y=R=2.15)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
3	-0.00004	66.388	-0.019
pu2	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	991.807	0.578
2	-0.0001	164.578	0.053
3	0.00004	20.325	0.023
p3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	364.572	0.658
2	-0.0001	-218.112	0.0003
3	-0.00004	-104.085	0.0001
pu3	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	410.412	0.542
2	-0.0001	-202.132	0.075
3	0.00004	-111.929	0.033
p4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	409.2807	-0.539
2	-0.0001	-202.549	0.076
3	-0.00004	-111.757	0.034
pu4	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	364.572	-0.657
2	-0.0001	-218.112	0.001
3	0.00004	-104.085	0.0005
p5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-206.949	-0.3202
2	-0.0001	-258.633	0.178
3	-0.00004	65.789	0.079
pu5	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-197.179	-0.429
2	-0.0001	-260.409	0.134
3	0.00004	62.963	0.059
p6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	-0.0004	-204.109	0.436
2	-0.0001	-259.158	0.1309
3	-0.00004	64.972	0.058
pu6	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z

грань 5($y=R=2.15$)	K_x, ξ_x	K_y, ξ_y	K_z, ξ_z
1	0.0004	-233.7601	0.324
2	-0.0001	-253.318	0.176
3	0.00004	73.319	0.078

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Акт о внедрении результатов диссертационной работы



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ПРОГРЕСС»
(АО «РКЦ «ПРОГРЕСС»)

ул. Земеца, д.18, г. Самара, 443009, тел. (846) 955-13-61, факс (846) 992-65-18, E-mail: mail@samspace.ru
ОКПО 43892776, ИНН 6312139922, КПП 997450001

Справка о внедрении

результатов диссертационной работы Бородулина Бориса Борисовича
«Алгоритмы и системы автоматического управления температурой
несущей конструкции автономного объекта»

Настоящая справка дана Бородулину Б.Б. в том, что полученные в его диссертационной работе результаты внедрены в расчетно-конструкторскую практику АО «РКЦ «Прогресс» г. Самара в форме базовых алгоритмов работы системы управления температурой несущей конструкции ряда изделий.

Внедренные алгоритмы и расчетные методики показали высокую эффективность, позволили обеспечить требуемые температурные режимы элементов конструкции, снизить величину термодформационной составляющей нестабильности положения аппаратуры размещенной на несущей конструкции.

Заместитель генерального
конструктора по научной работе,
к.т.н.



М.В. Борисов

13.04.2023

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Справка об использовании результатов кандидатской диссертации



99 ЗАВОД АВИАЦИОННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ХОЛДИНГ ВЕРТОЛЕТЫ РОССИИ

Акционерное общество
«99 завод авиационного
технологического оборудования»
(АО «99 ЗАТО»)

ул. Дорожная, д. 5, г. Щербинка,
г. Москва, 108852

Тел./факс +7(495) 984-68-59

ОГРН 1147746385500, ИНН 7751520180

e-mail: dir@99zato.ru

www.russianhelicopters.aero

23.03.2023 № 71/530

на № _____

Справка об использовании

результатов диссертационной работы Бородулина Бориса Борисовича

«Алгоритмы и системы автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта»

Настоящая справка дана Бородулину Б.Б. в том, что разработанная в его диссертации структура системы управления температурным состоянием несущей конструкции автономного объекта и методика расчета системы управления использованы при конструировании изделий нашим предприятием.

Расчетная методика и разработанная в диссертации система управления позволили существенно повысить качество изделий нашего предприятия.

Главный инженер – первый заместитель
управляющего директора



С. Агафонов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Справка об использовании результатов кандидатской диссертации в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ

Утверждаю

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «СамГТУ»



д.п.н., профессор

Юсупова О.В.

«20» 09 2022 г.

АКТ

научно-технической комиссии о внедрении положений и выводов диссертационной работы Бородулина Бориса Борисовича «Алгоритмы и системы автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе д.т.н., зав.кафедрой УСАТСК Лившица М.Ю., д.т.н., профессора зам. зав. Кафедрой УСАТСК Плешивцевой Ю.Э., к.т.н., доцента, зам. зав. Кафедрой УСАТСК Деревянова М.Ю., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Бородулина Б.Б., внедрены в учебный процесс на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Результаты научных исследований, проведенных Бородулиным Б.Б. использованы при выполнении выпускных квалификационных работ и при изучении учебных дисциплин «Идентификация и адаптация управления термодиффузионными процессами технологической теплофизики», «Теория управления теплоэнергетическими системами с распределенными параметрами», «Синтез систем управления», «Вычислительные методы и компьютерные технологии в управлении теплоэнергетическими системами».

Внедрение результатов диссертации улучшило качество учебного процесса.

Заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», д.т.н., профессор Лившица М.Ю.

Зам. зав. кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», д.т.н., профессор Плешивцева Ю.Э.

Зам. зав. кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», к.т.н., доцент Деревянов М.Ю.