



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

20 НОЯ 2023

№ 104-6135

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - проректор
по научно-исследовательской работе

Д.Т.Н., доцент

Прокофьев А.Б.

» ноября 2023 года



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Бородулина Бориса Борисовича

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

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Актуальность темы диссертационной работы

В современных условиях развития аэрокосмической отрасли широкое применение находят автономные объекты, к которым относятся космические аппараты, как наиболее представительный класс автономных объектов. Эффективность функционирования космических аппаратов в значительной степени зависит от качества и достоверности информации, полученной их бортовой информационно-измерительной системы, которая содержит кроме полезного сигнала, различные виды помех, вызывающих искажение информации. Существенную часть погрешности измерений составляет температурная погрешность из-за термодформации несущих конструкций, на которых размещена тепловыделяющая контрольно-измерительная аппаратура.

В большинстве современных космических аппаратов используются активные методы обеспечения теплового режима – управление локально распределенными теплоисточниками, жидкостными системами. Несмотря на значительное количество научных работ и патентов в этой области, проблема эффективного снижения термоградиентной составляющей погрешности измерений не решена. Космические аппараты представляют собой сложные автономные объекты, функционирующие в экстремальных условиях. При этом наличие экипажа на борту космического аппарата не устраняет проблем, связанных с его автономностью, т.к. эти проблемы определяются сложностью, а зачастую недоступностью энергетических, материальных и информационных коммуникаций. В частности, такими аппаратами являются спутники с телекоммуникационными системами, оснащенные оптическими измерительными приборами. Функционирование бортовых систем космических аппаратов в существенной степени зависит от качества измерительной информации, полученной путем измерений. Значительную долю в общей измерительной информации составляет информация, полученная от оптических информационно-измерительных систем. Оптические системы в космических аппаратах широко используются в различных областях. В подавляющем большинстве современных космических аппаратов, включая малые космические аппараты, работающих на орбите Земли, используются активные методы обеспечения теплового режима, включая обеспечение равномерного температурного поля на несущей конструкции информационно-измерительных систем. В этом случае используются различные методы управления локально распределенными на несущей конструкции теплоисточниками. В связи с вышеизложенным, актуальной и значимой становится задача разработки системы автоматического и оптимального управления температурным распределением по объему несущей конструкции космического аппарата путем изменения мощности размещенных на ней управляемых источников тепла.

Представленная диссертационная работа Бородулина Б.Б. направлена на решение этой **актуальной** задачи, имеющей существенное значение для развития Российской Федерации.

В работе поставлена цель - автоматическое управление температурными режимами несущей конструкции автономного объекта для повышения достоверности информации размещенных на ней бортовых информационно – измерительных систем.

Научная методология и структура диссертационной работы соответствует ее цели. Для достижения этой цели логично сформулированы, обоснованы и решены задачи:

Проанализировать современное состояние автоматического управления процессами управления температурой несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта;

Разработать функционально-ориентированную математическую модель температурного поля несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта в форме объекта управления с распределенными параметрами;

Разработать структуру подсистемы управления температурой несущей конструкции информационно-измерительных систем космического аппарата в составе системы обеспечения температурного режима;

Разработать локальные системы автоматического управления температурой в контрольных точках несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта;

Разработать алгоритмы автоматической термоградиентной стабилизации температуры несущей конструкции информационно-измерительных систем космического аппарата в составе системы обеспечения температурного режима;

Обосновать, поставить и решить для ответственных за термоградиентную компоненту погрешности информационно-измерительных систем космического аппарата сечений несущей конструкции

минимаксную задачу оптимального управления с подвижным правым концом траектории в негладкой области допустимых температурных состояний.

Таким образом, обоснованность в ходе выполнения диссертационного исследования результатов обеспечивается объемом и достоверностью исходных данных.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа Бородулина Б.Б. состоит из введения, аналитического обзора современного состояния автоматического управления, пяти глав собственных результатов, заключения, списка сокращений, указателя литературы, состоящего из 136 источников, включает четыре приложения. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок, 3 таблицы.

Структура диссертационного исследования Б.Б. Бородулина традиционна, соответствует современным стандартам. Способ изложения полученного материала логичен и упорядочен. Следует отметить значительный объем материала, основанного на результатах ранее проведенных исследований и являющегося их продолжением.

Во введении освещена суть проблемы и обоснованность темы исследования.

Первая глава посвящена аналитическому обзору современного состояния автоматического управления температурным режимом автономного объекта, состоящая из трех подразделов, которые органично составляют единый информационный блок. Глава содержит анализ проблемы обеспечения качества работы бортовых информационно-измерительных систем автономного объекта. Дается описание областей применения автономных объектов. Представлена предметная область исследования, выявлены особенности математического моделирования, управления и оптимизации тепловых режимов космического аппарата. В первой главе отражен единый взгляд на существующую проблему и обоснована

актуальность проводимой работы. Автор анализирует приводимые данные через призму собственного видения проблемы и аргументирует актуальность темы диссертации.

Во второй главе рассматривается автономный объект в виде малого космического аппарата, который включает в себя несущую конструкцию с размещенной на ней постоянно работающей и периодически включаемой аппаратурой. Поставлена задача математического моделирования, сформулирована неявная трехмерная математическая модель объекта управления. В качестве управляющих воздействий рассматриваются тепловые потоки от управляемых источников тепла. Предложена форма явной трехмерной математической модели температурного поля в виде комбинации одномерных краевых задач теплопроводности. Предложена модификация математической модели объекта управления неоднородным уравнением теплопроводности с однородными краевыми условиями, для получения передаточных функций с применением стандартизирующей функции.

Третья глава описывает функционально-ориентированную математическую модель объекта управления в форме передаточных функций. Получены расчетные формулы для передаточных функций по всем возможным каналам: по каналам «площадь»-«точка», «точка»-«площадь», «точка»-«точка», «площадь»-«площадь» теплопередачи в несущей конструкции космического аппарата.

В четвертой главе предложена схема подсистемы управления температурой несущей конструкции космического аппарата с использованием передаточных функций, полученных из предыдущей главы. Представлена детализация структуры локальной системы автоматического управления температурой для точки контроля несущей конструкции, также разработана структурная схема подсистемы автоматического управления тепловым режимом несущей конструкции космического аппарата, состоящей из локальных систем автоматического управления температурой N-го числа

контрольных точек. Проведен анализ предложенного алгоритма работы подсистемы управления температурой несущей конструкции космического аппарата с помощью различных регуляторов. На уточненной конечноэлементной численной модели в среде ANSYS демонстрируется эффективность предложенных в диссертации решений путем сравнения распределения температуры в несущей конструкции без использования алгоритма управления и с использованием алгоритма управления.

В пятой главе проводится сравнительный анализ алгоритмов автоматической термоградиентной стабилизации температуры несущей конструкции космического аппарата - непрерывный алгоритм системы автоматического управления температурой несущей конструкции и релейный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры несущей конструкции. В среде ANSYS построена имитационная конечно-элементная нелинейная модель температурного поля несущей конструкции космического аппарата и проведен сравнительный анализ трех режимов функционирования: без регулирования, с релейным и с непрерывным алгоритмом управления.

В шестой главе разработан алгоритм оптимального управления мощностью управляемых источников тепла в ответственном сечении несущей конструкции космического аппарата, обеспечивающий при проектном расположении управляемых источников тепла заданное отклонение температуры в этом сечении от требуемого уровня за минимально возможное время-максимальное быстроедействие, либо наименьшее отклонение температуры в этом сечении от требуемого уровня при произвольном времени управления - максимальную точность. В среде ANSYS демонстрируется результирующее температурное распределение для оптимального по точности управления.

В главах, где представлены результаты проведенных исследований, последовательно решены поставленные задачи, позволяющие прийти к обоснованным выводам, представленных в каждой главе.

Новизна проведенных исследований и полученных результатов

В диссертационной работе Б.Б. Бородулина получены новые научные результаты: разработана функционально-ориентированная математическая модель температуры несущей конструкции, отличающаяся от известных передаточными функциями, учитывающими размеры областей распределения теплоисточников и поверхностей теплоприемников; разработанные системы автоматического управления обеспечивают термоградиентную стабилизацию в условиях изменения режимов теплонагружения конструкции; решена задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции, отличающаяся от известных формулировкой определяющих уравнений альтернативного метода для вычисления управления мощностью теплоисточников.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Диссертационное исследование выполнено на высоком научно-техническом уровне. В работе применены подходы и методы, соответствующие цели и задачам исследования. Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе основных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением математического аппарата, соответствием фундаментальным физическим законам полученных результатов и совпадением частных результатов моделирования с результатами из независимых источников.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, использовались при выполнении НИР по проектам Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ: проект №17-08-00593, 2017-2019 гг. и проект №20-08-00240, 2020-2022 гг.; 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».

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. Результаты работы докладывались на международной и всероссийских конференциях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности и оценка содержания работы

Содержание и результаты проведенных исследований соответствуют научной специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», а именно следующим пунктам паспорта специальности:

- Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.;

- Методы планирования, оптимизации, отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом.

Диссертация оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями и содержит все необходимые составляющие такого уровня исследования.

Автореферат в полном объеме раскрывает основные положения диссертации, оформлен в соответствии с установленными требованиями. Текст диссертации написан хорошим литературным языком, основные ее результаты изложены логично и доказательно, подтверждены имитационным моделированием.

Замечания по диссертационной работе

1. В первой главе присутствует опечатка в нумерации подглав.

2. Вывод по первой главе можно было представить более обширно в соответствии с поставленными задачами.

3. В разделе 2.1 на рисунке 2.5 указаны циклограммы работы различных приборов, однако обозначение мощности везде одинаковое, что затрудняет понимание.

4. В разделе 4.5 графически показана разница между результатами работы системы с автоматическим управлением с ПИ- и ПИД-регулятором, однако, это отличие можно было представить также и в виде конкретных числовых значений.

5. В разделе 4.5 нет информации об условиях построения конечно-элементной модели в программной среде ANSYS, таких важных для расчета параметров, как количество узлов и элементов сетки, времени расчета одного цикла и т.д.

6. Во введение указано что общий объем работы изложен на 164 страницах, однако фактически объем составляет 166 страниц.

7. В диссертации представлены передаточные функции по каналу площадь-площадь, для чего они используются?

8. В четвертой главе представлены локальные системы автоматического управления в большом количестве (N). Чему равно количество систем автоматического управления?

9. Учитываются ли влияния локальных систем автоматического управления друг на друга? Если учитываются, то насколько сильно влияют?

Указанные вопросы и отмеченные замечания не снижают значимости полученных в диссертационном исследовании научных результатов и общего высокого уровня исследования.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационного исследования представляют несомненную научную и практическую ценность.

Результаты аналитического и численного моделирования, полученные в диссертации, могут быть использованы при моделировании, проектировании различных процессов технологической теплофизики, а также при создании систем автоматического управления различной физической природы.

Разработанные алгоритмы автоматического управления могут быть использованы как для штатных, так и нештатных режимов работы информационно-измерительных систем несущей конструкции.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования подтверждается их использованием на предприятиях АО «99 ЗАТО», АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» и в учебном процессе кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета.

Заключение

Представленная диссертационная работа «Алгоритмы и системы автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта» Бородулина Б.Б. является завершенной научно-квалификационной работой, вынесенные на защиту научные положения в достаточной мере обоснованы и соответствуют поставленным целям и решаемым задачам.

В работе рассмотрена и решена задача разработки эффективных функционально-ориентированных математических моделей и систем автоматического управления температурными режимами несущей конструкции автономного объекта, позволяющих обеспечить повышение достоверности информации размещенных на ней бортовых информационно – измерительных систем.

Диссертационная работа «Алгоритмы и системы автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта» соответствует требованиям п. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 (в действующей редакции), и

предъявляемым критериям к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор Бородулин Борис Борисович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертационная работа и отзыв рассмотрены и утверждены на расширенном заседании кафедры «Теплотехники и тепловых двигателей» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» 15 ноября 2023 г., протокол №3.

«Присутствовало» - 19 человек; «проголосовало» - 19 человек;

«За утверждение» - 19 человек;

«Против» - 0 человек;

«Воздержались» - 0 человек.

Заместитель заведующего
кафедрой теплотехники и
тепловых двигателей
Самарского университета
д.т.н., профессор

Бирюк Владимир Васильевич

Тел.: +7 (846) 335-18-12

E-mail: teplotex_ssau@bk.ru



Подпись Бирюка ВВ удостоверяю
Ученый секретарь Самарского университета
И.П. Васильева И.П.
20 » ноября 2023 г.

Полное наименование: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Сокращено наименование: Самарский университет

Адрес: 443086, Приволжский федеральный округ, Самарская область,
г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Телефон: + 7 (846) 335-18-26. E-mail: ssau@ssau.ru. Веб-сайт: <https://ssau.ru/>