

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу **Бородулина Бориса Борисовича**
«Алгоритмы и системы автоматического управления температурой
несущей конструкции автономного объекта»,
представленную на соискание учёной
степени кандидата технических наук по специальности
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

1. Актуальность темы диссертационной работы.

Эффективность функционирования космических аппаратов во многом определяется качеством и достоверностью работы бортовой информационно-измерительной системы, размещаемой на несущей конструкции. Острота проблемы удовлетворения повышенных требований к точности измерений в современных условиях только увеличивается. Источником существенной погрешности, влияющей на точность измерений, особенно оптических, является термодетформация несущей конструкции, которая возникает из-за тепловыделений от работающей аппаратуры, а также неравномерного влияния внешней среды на космический аппарат. Для космических аппаратов, как наиболее представительного класса автономных объектов, даже незначительное смещение условной оптической оси может привести к существенным погрешностям в показаниях оптических приборов при значительном удалении от объекта измерения, а также может привести к недопустимым ошибкам в определении собственного место- и углового положения космического аппарата. Поэтому задача эффективного снижения термоградиентной составляющей погрешности измерений с помощью автоматического управления температурой несущей конструкции космических аппаратов, решению которой посвящена диссертация Бородулина Б.Б. является актуальной и значимой.

2. Общая характеристика работы.

Диссертационная работа содержит шесть глав, введение и заключение. Текстовый материал состоит из 166 страниц текста, дополнен рисунками, схемами и таблицами, включены 4 приложения. Список литературы включает 136 наименований.

Во введении кратко обоснованы актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены задачи, определена научная новизна полученных результатов, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обзору современного состояния автоматического управления температурными режимами автономных объектов, включая вопросы оптимального управления, проанализированы публикации по вопросам обеспечения тепловых режимов космических аппаратов и их оптимизации.

Во второй главе в качестве объекта управления рассматривается температурное распределение в несущей конструкции космического аппарата, приводится тепловая схема несущей конструкции космического аппарата, разработана математическая модель объекта управления.

В третьей главе предложена схема идентификации, построенной в среде ANSYS численной конечно-элементной модели, коэффициентов и постоянных времени передаточных функций систем автоматического управления температурным распределением в несущей конструкции.

В четвертой главе разработана структура системы управления температурой несущей конструкции космического аппарата. Представлены результаты настройки пропорционально-интегрального и пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в локальных системах автоматического управления температурой контрольных точек несущей конструкции. Предложен простейший алгоритм управления мощностью управляемых источников тепла. Простейший алгоритм управления в ходе

верификации на уточненной нелинейной конечно-элементной модели продемонстрировал достаточно высокую эффективность.

В пятой главе предложены два рабочих алгоритма управления: непрерывный и релейный, включающие в себя алгоритм диагностики датчиков и управляемых источников тепла. Применение каждого из алгоритмов зависит от предъявляемых требований к температурному режиму несущей конструкции и выделенных на обеспечение температурного режима бортовых энергетических ресурсов. Осуществляется уточненное конечно-элементное моделирование несущей конструкции в среде ANSYS с системой автоматического управления ее температурным распределением в штатных и внештатных режимах. Проводится сравнительный анализ применения непрерывного и релейного алгоритмов управления. В ходе анализа установлено, что имеет место существенная энергоэффективность релейного алгоритма по сравнению с непрерывным, однако в тоже время использование релейного алгоритма приводит к снижению точности управления температурным режимом несущей конструкции.

В шестой главе разработан алгоритм оптимального управления мощностью источников тепла для наиболее подверженного температурным деформациям сечения несущей конструкции. Поставлены задача максимальной точности и задача быстрогодействия. Для решения поставленных задач используется альтернативный метод Э.Я. Рапопорта, вычислительная процедура которого модернизирована автором диссертации. Численное решение задачи выполнено с использованием программной среды ANSYS. Получены зависимости оптимального температурного распределения от теплофизических характеристик материала несущей конструкции, позволяющие реализовать двухинтервальное оптимальное управление, и предельно допустимые в рассматриваемом классе оптимального управления кондиции температурного поля несущей конструкции. Предложенный алгоритм оптимального управления позволяет на этапе проектирования обеспечить снижение энергетического и массогабаритного показателей системы обеспечения теплового режима.

Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют целям и задачам исследования.

3. Научная новизна работы и полученных результатов.

Известны работы по обеспечению теплового режима космического аппарата Е.А. Микрина, С.В. Цаплина, А.Г. Викулова и других авторов. Наиболее близкими тематически к диссертации Б.Б. Бородулина являются работы М.Ю.Лившица и Ю.О.Савельевой. Однако в них рассматривалось управление температурным полем несущей конструкции космического аппарата только в ответственном (диагональном) сечении несущей конструкции, а не во всем ее объеме; использовались распределенные передаточные функции только типа " точка-точка" и не решалась задача оптимального управления температурным полем всей несущей конструкции. В диссертации Б.Б. Бородулина эти задачи впервые поставлены и решены.

Автором получены следующие научные результаты, обладающие существенной научной новизной:

1. Предложена модификация математической модели теплопереноса в неравномерно теплонагруженной несущей конструкции с учетом площади поверхности источников тепла и поверхностей теплоотводов, ориентированная на применение в системах автоматического управления.
2. Разработана структура системы управления температурой несущей конструкции, состоящая из локальных систем автоматического управления температурой контрольных точек несущей конструкции.
3. Разработаны эффективные алгоритмы термоградиентной стабилизации температуры несущей конструкции. Проведено имитационное моделирование в среде ANSYS для различных в том числе нерасчетных режимов эксплуатации космического аппарата.
4. Поставлена и решена задача оптимального управления дискретно распределенными источниками тепла, обеспечивающими температурную стабильность ответственного сечения несущей конструкции с использованием альтернативного метода Э.Я. Рапопорта.

4. Достоверность и обоснованность основных положений работы.

В работе применены подходы и методы, соответствующие цели и задачам исследования. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием классических и современных методов математического анализа, методов аналитического и имитационного моделирования с применением современного компьютерного программного обеспечения, а также соответствием полученных результатов фундаментальным физическим законам и совпадением частных результатов моделирования с результатами из независимых источников.

Содержание основных разделов работы демонстрирует полноту и научную обоснованность проведенного соискателем исследования. Научный материал изложен корректно, полученные результаты проиллюстрированы графиками, обеспечивающими наглядность.

Результаты работы апробированы на международных и всероссийских конференциях.

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

5. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики.

Результаты синтеза системы автоматического управления температурой несущей конструкции информационно-измерительных систем автономного объекта в силу универсального характера применимы при синтезе систем управления температурой в промышленных процессах технологической теплофизики.

Особенное значение приобретает использование результатов диссертационного исследования при разработке и эксплуатации современных космических аппаратов, включая малые космические аппараты. Разработанные алгоритмы и системы автоматического управления позволяют снизить влияние

термодеформаций несущей конструкции на точность работы информационно измерительной системы.

Практическая значимость подтверждается и тем, что разработанные методы внедрены в расчетно-проектную 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.

6. Замечания по диссертационной работе.

По диссертации имеются вопросы и замечания:

1. В разделе 2.1 не обоснован выбор количества и расположение точек контроля на несущей конструкции.
2. В разделе 2.2 указано, что несущая конструкция - композитная армированная конструкция с неоднородными теплофизическими и механическими характеристиками в различных направлениях. Корректно ли в диссертации рассматривать ее как изотропную? Как оценить погрешности возникающие при этом приближении?
3. В разделе 3.1 на рисунке 3.3 демонстрируется схема идентификации, где подписан элемент «Визуальный». Что подразумевает это название? Что данный элемент выдает в качестве результата?
4. В разделе 4.2 регулятор строится с переменной структурой, в одних условиях – реле, в других условиях — это либо ПИ-регулятор, либо ПИД-регулятор. Как это реализовано физически в автономном объекте?
5. В разделе 3.1 проводится идентификация структуры объекта на основании данных полученных из Matlab и Ansys, а в главе 4.2 указывается, что синтез системы автоматического регулирования производится для заранее спроектированной несущей конструкции. Почему при идентификации не учитывались данные практических экспериментов влияния источников тепла на реальную несущую конструкцию?
6. Во второй главе в выводах присутствует опечатка «...одинарные краевые условия...», скорее всего имеются ввиду однородные краевые условия?

7. В выводах по пятой главе сравниваются непрерывный и релейный алгоритмы, их количественные оценки несомненно важны и интересны, однако качественные выводы можно было бы предсказать заранее.

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

7. Заключение.

Диссертация «Алгоритмы и системы автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта» Бородулина Б.Б. является завершенной научно-квалификационной работой, отвечающей требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК России.

В диссертации разработаны: математическая модель температурного распределения в несущей конструкции космического аппарата; алгоритмы систем управления, позволяющие обеспечить термоградиентную стабильность конструкции в нестационарных условиях теплонагружения с помощью управляемых теплоисточников; представлены результаты работы систем управления на конечно-элементной компьютерной имитационной модели; осуществлена постановка и решение минимаксной задачи дискретно распределенного оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции автономного объекта.

Диссертация соответствует предметной области научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, а именно следующим пунктам паспорта специальности:

пункт 3 - 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.;

пункт 5 - Методы планирования, оптимизации, отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации функциональных и обеспечивающих подсистем

АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом.

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.

Официальный оппонент: Ненарокомов Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Космические системы и ракетостроение» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Ненарокомов Алексей Владимирович

«15» ноября 2023 г.

Подпись профессора, д.т.н., профессора
кафедры «Космические системы и
ракетостроение» МАИ
А.В.Ненарокова заверяю:

Зам. начальника отдела кадрового
делопроизводства работников



Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Сайт: <https://mai.ru/> E-mail: aleksey.nenarokomov@mai.ru Тел.: 8(499)158-47-56