

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

Актуальность

Автономные объекты активно используются в авиационной и космической отраслях, в глубоководных исследованиях, в автомобильной промышленности. Функционирование автономных устройств, в частности космических аппаратов, во многом зависит от качества информации, сформированной бортовыми информационно измерительными системами. На качество этой информации влияют различные возмущающие факторы. Одним из таких факторов является температурный, возникающий из-за термодформации несущей конструкции. Термодформация несущей конструкции особенно сильно влияет на показания оптических измерительных устройств. Тепловая нагрузка на несущую конструкцию автономных объектов имеет нестационарный характер, из-за локальных тепловыделений от работающей аппаратуры, влияния внешней окружающей среды. Условием эффективного и надежного функционирования автономных объектов является обеспечение определенного теплового режима, обеспечиваемого системами терморегулирования. Термодформационная погрешность информационно-измерительной системой может привести к недопустимым ошибкам в определении собственного местоположения и курса автономного объекта, что в ряде случаев приводит к тяжелым авариям и катастрофам. Автором поставлена цель - автоматическое управление температурными режимами несущей конструкции автономного объекта для

повышения достоверности информации размещенных на ней бортовых информационно – измерительных систем. Для достижения цели поставлено шесть научно-технических задач. Цель и задачи полностью соответствуют выбранной теме, работа посвящена разработке алгоритмов и систем автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта, в качестве которого рассматривается космический аппарат. Тема является актуальной и соответствует стратегии научно-технологического развития России.

Научная новизна работы

Автором заявлены четыре положения научной новизны и получены новые научные результаты: разработана функционально-ориентированная математическая модель объекта управления; разработаны алгоритмы автоматического управления температурным распределением несущей конструкции; результаты имитационного моделирования, позволяют выявить возможности разработанных алгоритмов в штатных, нештатных (нерасчетных) режимах использования размещенных на несущей конструкции информационно измерительных систем; поставлена и решена минимаксная задача оптимального управления температурой в выбранном ответственном сечении несущей конструкции с подвижным правым концом температурной траектории в негладкой области конечных состояний.

Значимость полученных результатов для развития соответствующей отрасли науки и производства

В диссертационной работе получены следующие результаты: разработана методика моделирования, численные и аналитические математические модели управляемого температурного распределения несущей конструкции; определены передаточные функции по рассматриваемым каналам передачи тепла;

построена структура системы и алгоритма автоматического управления температурным распределением несущей конструкции с помощью управляемых источников тепла;

разработан метод решения определяющих уравнений в поставленных оптимальных задачах;

с использованием альтернативного метода Э.Я. Рапопорта, поставлена и решена задача оптимального управления дискретно распределенными теплоисточниками, обеспечивающими температурную стабильность ответственного сечения несущей конструкции;

Полученные результаты могут быть использованы при моделировании, проектировании различных процессов технологической теплофизики, а также при создании систем автоматического управления различной физической природы.

Практическая значимость результатов работы подтверждается актами о внедрении и использовании результатов диссертации на предприятиях и в учебном процессе.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Используемые подходы и методы соответствуют целям и задачам исследования.

Научные положения, выводы и рекомендации обоснованы и подтверждены результатами численных экспериментов; основываются на анализе работ, посвященных проблемам: моделирования тепловых процессов, численного решения задач теплопроводности, разработки тепловых моделей, управления тепловыми процессами, информационно-измерительных систем и систем управления космическим аппаратом, автоматического управления температурой несущей конструкции автономного объекта.

Полученные результаты не противоречат известным положениям в данной области исследований.

Основные результаты диссертационной работы прошли широкую апробацию на Всероссийских и международных конференциях, опубликованы в 15 изданиях, включая 7 статей в изданиях, индексируемых в наукометрической базе SCOPUS; 1 статью в журнале, рекомендованных ВАК; 7 статей в изданиях, индексируемых в РИНЦ..

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 166 страницах, список литературы насчитывает 136 наименований.

Во введении определена актуальность работы, анализируется степень разработанности темы, сформулирована цель исследования, поставлены задачи, выявлена научная новизна полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ современного состояния исследований в области моделирования и управления температурой несущей конструкции информационно-измерительных систем космических аппаратов. Температура в отсеках космического аппарата и несущей конструкции отклоняется от требуемой под воздействием внешних тепловых возмущений - прямого и отраженного от планет солнечного теплоизлучения, влияния космического вакуума при открывании люков и т.п; и внутренних тепловых возмущений – тепловыделения при работе функциональной аппаратуры, размещенной на несущей конструкции. Термодеформация несущей конструкции приводит к искажению результатов измерений. В главе установлено, что проблема эффективного снижения термоградиентной составляющей погрешности измерений, особенно оптических, не решена к настоящему времени.

Вторая глава посвящена обоснованию задачи математического моделирования температурного распределения в теплонагруженной нестационарными тепловыми потоками несущей конструкции от размещенных на ней приборов информационно измерительной системы и внешними тепловыми потоками.

Автором, в качестве автономного объекта управления, рассматривается малый космический аппарат, на несущей конструкции которого размещена информационно измерительная система и другие источники тепловыделения. Разработана функционально-ориентированная математическая модель объекта управления в форме передаточных функций. Для термостабилизации несущей конструкции космического аппарата в условиях нестационарной и неравномерной тепловой нагрузки разработана система автоматического управления мощностью управляемых теплоисточников, как средства термоградиентной стабилизации.

В третьей главе представлена функционально ориентированная модель объекта управления в форме структурной схемы с распределенными передаточными функциями. Представлены результаты идентификации объекта управления с использованием уточненной конечно-элементной модели в среде «ANSYS», и структуры передаточных функций в программной среде «Matlab».

В четвертой главе для управления температурным полем нестационарно и неравномерно нагруженной несущей конструкции построена супервизорная система автоматического управления, которая состоит из локальных систем автоматического управления в дискретно распределенных по поверхности несущей конструкции контрольных точках. Термостабильность несущей конструкции обеспечивается с помощью управляемых теплоисточников, размещенных на поверхности несущей конструкции. Предложен алгоритм работы системы автоматического управления мощностью управляемых теплоисточников с регулятором переменной структуры в режиме реального времени. В программной среде

ANSYS путем уточнённого имитационного моделирования исследовано температурное распределение несущей конструкции при использовании разработанных систем автоматического управления.

В пятой главе демонстрируются результаты применения различных алгоритмов автоматической термоградиентной стабилизации. Представлен непрерывный алгоритм стабилизации, использующий пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления, позволяющий непрерывно регулировать мощность управляемых теплоисточников. Непрерывный алгоритм отличается быстроедействием (время регулирования 17 сек. и 120 сек. в зависимости от режима работы информационно измерительной системы) и высокой точностью (температурный перепад несущей конструкции космического аппарата в среднем не превышает 1 градус Кельвина). Представлен релейный алгоритм термоградиентной стабилизации температуры несущей конструкции, простой в реализации, требующий небольшого информационного ресурса памяти, обеспечивающий суммарные низкие энергозатраты (порядка пятнадцати раз ниже, чем при непрерывном алгоритме) на управление мощностью источников тепла температурного регулирования. Проведено конечно-элементное моделирование при разных режимах работы – штатном (проектном) и нештатном (отличным от проектного); в ходе имитационного моделирования. Установлена эффективность обоих алгоритмов локальных систем автоматического управления. Существенная энергоэффективность релейного алгоритма по сравнению с непрерывным, достигнута за счет снижения качества температурного режима несущей конструкции. В случае менее строгих требований к точности информационно измерительной системы космического аппарата, можно рекомендовать релейный алгоритм управления. Для удовлетворения требованиям повышенной точности информационно измерительной системы в рассматриваемом типе космического аппарата следует использовать непрерывный алгоритм.

В шестой главе представлен алгоритм оптимального управления мощностью теплоисточников в наиболее подверженном термодформации ответственном сечении несущей конструкции космического аппарата, обеспечивающий при заданном расположении теплоисточников варианты решения задачи: обеспечения максимальной точности - наименьшего отклонения температуры в ответственном сечении от требуемого уровня за произвольное время управления или задачи быстродействия - заданное допустимое отклонение температуры за минимально возможное время управления. В качестве критерия оптимальности при постановке задачи максимальной точности использована Чебышевская норма. Численная процедура решения поставленных минимаксных задач оптимального управления альтернативным методом Э.Я.Рапопорта модифицирована с учетом дискретно распределенных по поверхности несущей конструкции управляемых теплоисточников.

Структура и содержание диссертационной работы соответствуют целям и задачам исследования.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на отмеченные положительные стороны диссертационной работы, имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Диссертация выполнена в программных продуктах «Matlab» и «Ansys», можно ли было проделать аналогичные вычисления в отечественных программных средах?
2. На рисунке 2.5 раздела 2.1, на оси ординат значение мощности приборов различается, однако высота обозначения везде одинаковая, что затрудняет понимание.
3. В разделе 5.1 для описания алгоритмов автоматической термоградиентной стабилизации используются точки управления, которые одновременно являются контрольными и снабжены датчиками температуры.

Целесообразно ли каждую точку управления совмещать с точкой контроля температуры?

4. В разделе 6 рисунок 6.4 на оси ординат не указаны единицы измерения, а на рис. 6.5 и 6.6 следовало бы надписи сделать более читаемыми (увеличить формат надписей).

5. Не приводятся технические сведения о потенциально используемом оборудовании системы автоматического управления температурным распределением несущей конструкции.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

**Заключение о соответствии диссертации критериям,
установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

В диссертационной работе Бородулина Б.Б. решается актуальная научно-техническая задача контроля и управления температурным режимом автономного объекта. Решена задача оптимального управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции. Разработанные алгоритмы и системы управления температурой несущей конструкции автономного объекта обеспечивают компенсацию деформаций несущей конструкции, тем самым снижая термоградиентную составляющую погрешности измерений, что особенно важно для оптических систем.

Диссертационное исследование выполнено на высоком научно-методическом уровне.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, пунктам 3 и 5.

Считаю, что диссертационная работа «Алгоритмы и системы автоматического управления температурой несущей конструкции

автономного объекта» представляет научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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

Першин Иван Митрофанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем управления и информационных технологий, Пятигорский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Пятигорск

Першин Иван Митрофанович

«22» ноября 2023 г.

Подпись Першина Ивана Митрофановича удостоверяю: заместитель директора по научной и инновационной деятельности Пятигорского института (филиала СКФУ), доктор политических наук, профессор



А.А. Вартумян