

На правах рукописи



САВЕЛЬЕВА ЮЛИЯ ОЛЕГОВНА

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ
АВТОНОМНОГО ОБЪЕКТА**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Самара - 2021

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

Научный руководитель:	Лившиц Михаил Юрьевич , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».
Официальные оппоненты:	Душин Сергей Евгеньевич , доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», профессор кафедры «Автоматика и процессы управления». Титов Дмитрий Михайлович , кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Космические системы и ракетостроение».
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Защита состоится «05» апреля 2022 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

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

Автореферат разослан « » _____ 20__ г.

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

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

Е.Е. Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Автономные объекты в значительной степени определяют направление развития ведущих промышленных мировых держав. В настоящей работе, не претендуя на исчерпывающее определение, автономными объектами называются мобильные технические устройства, не имеющие на борту управляющего ими экипажа и связанные с окружающей средой не материальными, а информационными потоками. Автономные объекты используются в различных сферах: космической, научной, промышленной, военной, медицинской и многих других.

Эффективность автономного объекта в первую очередь зависит от качества работы размещенных на нем информационно-измерительной и управляющей систем. Большую долю в общую погрешность информационно-измерительных систем автономных объектов вносят температурные возмущения. Влияние температурных возмущений приводит не только к недопустимому искажению полезной информации, но и, зачастую, к аварии, утрате автономного объекта или даже к катастрофе, например, из-за ошибки в ориентации.

Актуальной является задача создания и математического моделирования автоматической системы обеспечения теплового режима автономного объекта, с требуемой точностью поддерживающей как заданную температуру во всех рабочих зонах автономного объекта, особенно в зонах размещения оптической контрольно-измерительной аппаратуры, так и предотвращающей недопустимую неравномерность температурного распределения температуры в сечениях несущих конструкций, влияющих на отклонение оптической оси соответствующих приборов информационно-измерительных систем. Эти сечения в диссертации называются ответственными.

Степень разработанности темы исследования. Диссертационное исследование при моделировании температурных процессов методами математической физики опирается на работы: Г. Карслоу, А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.Я. Арсенина, Г.Н. Дульнева, Г. Джеффриса, Б. Свирлса, Б.М. Будака, А.А. Самарского, А.Д. Полянина, А.В. Лыкова, В.С. Зарубина, П.Н. Вабищевича, М.М. Yovanovich, A.F. Lynch, Behrooz Abbasi Souraki, N. Assareh, M. Omid, Antonio Campo, Salah Chikh и др.

Задачи идентификации тепловых моделей отражены в работах О.М. Алифанова, А.В. Ненарокова, Ю.М. Мацевитого, С.В. Резника, Л.А. Коздобы, П.В. Просунцова, J.V. Beck, J. Gullum, K. Miller, N.M. Lazuchenkov, D.N. Lazuchenkov и др.

Проблемы автоматизации и оптимизации систем с распределенными параметрами исследованы в работах: А.Г. Бутковского, А.А. Фельдбаума, Т.К. Сиразетдинова, А.М. Цирлина, В.Я. Ротача, Э.Я. Рапопорта, Ю.В. Егорова, А.И. Егорова, С.Е. Душина, И.М.Першина, W.H. Ray, H.O. Fattorini,

М. Kim, Y. Sakawa и др. Исследования в области теплогидравлических процессов представлены в работах И. Чермака, В. Петерки, И. Заворки, М.А. Михеева, Г.Н. Дульнева, Г.А. Дрейцера, Г.В. Кузнецова, В.К. Мигай, S.W. Chi, M.C. Zaghdoudi, T.W. Moss, W.J. Bowman и др.

Глубокий анализ влияния термдеформации несущей конструкции космического аппарата или ее элементов на качество оптических измерений проведен в работах Я.М. Клебанова и А.Н. Давыдова при участии А.Н. Козлова. Исследованию информационно-измерительных систем и систем автоматического управления космическими аппаратами и их тепловыми режимами посвящены работы Б.Н. Петрова, В.П. Легостаева, Е.А. Микрина, В.В. Малоземова, А.Г. Викулова, Л.В. Быкова, С.В. Цаплина, В.С. Финченко, П.К. Кузнецова, Е.Ю. Финченко, R. Schmidt, E. Gustafson, H. Tomana, O. Akira, B. Fox, L. Brewster и др.

Несмотря на большое количество исследований, проблему термоградиентной стабилизации несущих конструкций автономных объектов к настоящему времени нельзя считать эффективно решенной.

Во-первых, описание в аналитической форме математической модели непрерывно распределенного по несущей конструкции трехмерного температурного поля с дискретно распределенными управляемыми нагревателями, системой жидкостного охлаждения и возмущающими теплоисточниками, ее идентификация, верификация и представление в качестве объекта управления для синтеза соответствующей системы представляет существенную теоретическую сложность.

Во-вторых, для численного моделирования работы систем автоматического управления распределенными объектами с дискретно распределенным возмущением использование известных программных средств наталкивается на значительные трудности.

В-третьих, проблема синтеза систем автоматического управления с распределенными параметрами для автономных объектов, функционирующих в условиях весогабаритных, энергетических и других ресурсных ограничений, к настоящему времени эффективно не решена.

Целью диссертационной работы является повышение качества выполнения автономными объектами функциональных задач в условиях воздействия неравномерных и нестационарных тепловых нагрузок путем снижения термоградиентной составляющей погрешности информационно-измерительной аппаратуры с помощью системы автоматического управления температурным распределением в ответственном сечении несущей конструкции.

Для обеспечения размерной термостабильности несущей конструкции автономного объекта и снижения возможной термдеформации, обеспечения управления температурой несущей конструкции в диссертации ре-

шаются следующие **задачи**:

1. Разработка аналитической функционально-ориентированной на применение в системах автоматического управления математической модели температурного распределения в несущей конструкции автономного объекта при нестационарной и неравномерной тепловой нагрузке.

2. Преобразование аналитической функционально-ориентированной математической модели к структурной схеме объекта управления с распределенными параметрами.

3. Аналитическое и численное решение краевых теплогидравлических задач и задач теплопроводности в объекте управления при неравномерной тепловой нагрузке.

4. Получение, идентификация и аппроксимация распределенных передаточных функций управляемого теплогидравлического процесса.

5. Синтез системы автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного объекта в условиях нестационарного и неравномерного тепловыделения размещенной по ней информационно-измерительной аппаратуры и внешней среды.

6. Аналитическое и расчетно-имитационное численное моделирование автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного в условиях нестационарной и неравномерной тепловой нагрузки.

7. Реализация алгоритмов автоматического управления, расчетных методов, математических моделей в практике расчета, моделирования и управления температурными полями несущих конструкций объектов различного назначения и степени автономности.

Научная новизна полученных результатов:

1. Предложена методика моделирования и разработана функционально-ориентированная на применение в системах автоматического управления аналитическая математическая модель управляемого распределения температуры в несущей конструкции автономного объекта при нестационарной и неравномерной тепловой нагрузке. Модель отличается от известных включением в нее сопряженных краевых задач управляемого нагрева локальными термоэлектрическими нагревателями и охлаждения управляемой системой жидкостного охлаждения, что позволяет, при обоснованных допущениях, синтезировать распределенную систему автоматического управления температурным полем несущей конструкции.

2. Разработана система автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного объекта в условиях нерав-

номерных и нестационарных возмущений тепловыделяющей измерительной аппаратуры и внешней среды. Отличительной особенностью системы является использование в качестве дискретно-распределенного управления мощности размещенных на конструкции управляемых локальных термоэлектрических нагревателей и температуры жидкостного теплоносителя на входе в трубопровод.

3. Разработана структура, содержащая распределенные передаточные функции и переходные блоки, описывающая неравномерное нестационарное распределение температуры в несущей конструкции, в отличие от известных, отражающая управляемые теплогидравлические процессы с помощью распределенной передаточной функции трубопровода с теплоносителем и неравномерным теплообменом по боковой поверхности трубопровода с несущей конструкцией. Структурная модель является конечномерной аппроксимацией бесконечномерного распределенного объекта управления и системы охлаждения и, в отличие от известных, позволяет на основе параметрической идентификации провести декомпозицию структуры и альтернативным методом произвести оптимальную по заданным критериям параметрическую настройку локальных регуляторов.

4. Разработана в программной среде ANSYS расчетно-имитационная конечно-элементная математическая модель системы автоматического управления сопряженным теплогидравлическим процессом температурного распределения на линии ответственного сечения несущей конструкции автономного объекта. В отличие от известных теплогидравлических моделей, она свободна от большинства допущений аналитического моделирования, содержит алгоритм моделирования и программный блок автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции автономного объекта.

Теоретическая и практическая значимость. Методика моделирования теплогидравлических процессов как объектов управления может быть использована при создании непрерывно-дискретных систем автоматического и автоматизированного управления различными объектами технологической теплофизики. Результаты аналитического и численного моделирования, полученные в диссертации, могут быть использованы в расчетно-проектной практике при создании несущих конструкций, подвергающихся неравномерной и нестационарной тепловой нагрузке, для которых существенна термоградиентная деформация. Разработанные алгоритмы управления, синтезированная структура системы управления, методы ее декомпозиции и аппроксимации передаточных функций имеют перспективы применения в системах обеспечения теплового режима объектов различного назначения и степени автономности.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных в диссертации задач применяются методы математической физики: метод функций Грина, метод конечных интегральных преобразований; методы теории автоматического управления: методы параметрической идентификации, методы теории распределенных систем, альтернативный метод оптимальной настройки регуляторов. С целью компьютерного моделирования использован метод конечных элементов. Используются программные пакеты: Wolfram Mathematica, MATLAB, ANSYS Workbench, ANSYS Mechanical APDL, программный блок моделирования работы системы автоматического управления численной моделью написана на языке Python.

Область исследования диссертации соответствует научной специальности Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика моделирования и математическая модель распространения тепла в несущей конструкции автономного объекта в аналитической форме краевых задач и их решения, в форме структуры передаточных функций в программной среде MATLAB Simulink, в численной форме сопряженной теплогидравлической задачи в программной среде ANSYS Workbench.

2. Структура и алгоритм системы автоматического управления температурным распределением на линии ответственного за термоградиентную деформацию сечения несущей конструкции в условиях возмущений размещенной на конструкции тепловыделяющей информационно-измерительной аппаратуры и внешней среды.

3. Численная расчетно-имитационная математическая модель сопряженного теплогидравлического управляемого температурного распределения в несущей конструкции автономного объекта и трубопроводах системы жидкостного охлаждения конструкции.

4. Результаты численного решения сопряженной теплогидравлической задачи температурного распределения несущей конструкции информационно-измерительной системы малого орбитального космического аппарата в определенных режимах ее работы.

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

Апробация работы. Полученные в работе результаты использованы при выполнении НИР по следующим 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 г., тема: «Разработка методов математического моделирования и управления по системным критериям качества тепло- и массообменными процессами в автономных объектах и технологической теплофизике».

Основные положения и результаты исследований докладывались на XXI международной научной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» ПУМСС (СамГТУ, Самара, 2019 г.), II всероссийской научно-практической конференции «Молодежная наука: вызовы и перспективы» (СамГТУ, Самара, 2019 г.), Международной научной конференции «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» CYBERPHY (CYBERPHY-2020, CYBERPHY-2021) и Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях»: ММТТ-33 (КНИТУ, Казань, 2020 г.), ММТТ-33 (БНТУ, Минск, 2020 г.), ММТТ-34 (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2021 г.).

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях ООО «СКТБ «Пластик», АО «ТЯЖМАШ», АО «Сызранский НПЗ» и использованы при разработке системы автоматического управления тепловым режимом. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 9 научных работ, среди которых 2 статьи, индексируемых в международной наукометрической базе SCOPUS, 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 4 статьи в журналах, входящих в РИНЦ.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, состоит в разработке методики моделирования, численных и аналитических математических моделей температурного распределения на линии ответственного сечения несущих конструкций, структуры и алгоритма системы автоматического управления температурным распределением, определением передаточных функций в структуре системы автоматического управления.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы изложен на 192 страницах, содержит 147 рисунков, 6 таблиц с листингами программы, список литературы из 173 наименований и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, новые научные результаты, их практическая значимость и достоверность, основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе приведен обзор современного состояния проблемы управления температурным состоянием автономных объектов (АО). Установлено, что термоградиентная деформация несущей конструкции (НК) приводит к недопустимому искажению информации, поступающей от размещенной на ней информационно-измерительной системы (ИИС), в первую очередь к абберации оптических измерений. Источниками термдеформаций НК являются нестационарное и неравномерное тепловыделение размещенной на НК аппаратуры и внешнее тепловое воздействие. Проанализированы методы математического моделирования температурного распределения в НК. Для расчетно-имитационного численного моделирования методом конечных элементов выбрана программная среда ANSYS. В качестве математического аппарата для создания соответствующей системы управления температурным состоянием НК АО применяется аппарат теории систем с распределенными параметрами. Проанализированы основные технические средства и методы обеспечения теплового режима типовых АО. В качестве базового АО выбран малый орбитальный космический аппарат (КА), т.к. его конструкция, условия эксплуатации, типичная ИИС, содержащая тепловыделяющую аппаратуру и оптико-электронные приборы Pr1...Pr4, Pru1...Pru4, PrC1, Prh1, PrC2, Prh2, Pra, Prb, размещенные на поверхности НК, характерны для широкого спектра АО. Установлено, что для обеспечения допустимого уровня термоградиентной погрешности, необходимо обеспечить достаточное отклонение от равномерного температурного распределения на диагональной линии ответственного сечения (ЛОС) НК в точках контроля (ТК) с помощью системы автоматического управления (САУ) пленочными термоэлектрическими нагревателями (ТН) St1...St9 и S1...S9, расположенными на поверхности НК и температурой жидкостного теплоносителя в парах трубопроводов (ТП) tr1...tr5 системы жидкостного охлаждения (СЖО) конструкции, также контактирующих с поверхностью НК, имеющей форму близкую к прямоугольной призме (пластине), областями f1...f5 (рисунок 1).

На основании анализа литературных источников и технических заданий АО различных видов сформулирована техническая задача разработки САУ температурным распределением диагональной ЛОС НК (рисунок 1), ответственной за наибольший вклад в термоградиентную составляющую погрешности ИИС АО.

В диссертации поставлена задача для рассматриваемого класса АО поддерживать заданную из температурного диапазона температуру на диагональной ЛОС НК с помощью разработанной САУ из температурного диапазона с отклонением в ТК от заданного, не превышающим $\pm 2^\circ\text{C}$. Выполнение требований необходимо обеспечивать в условиях тепловыделения размещенной на НК тепловыделяющей аппаратуры, работающей по циклограммам (рисунок 2), $P_n = 20$ Вт, $t_1 = 30000$ сек.

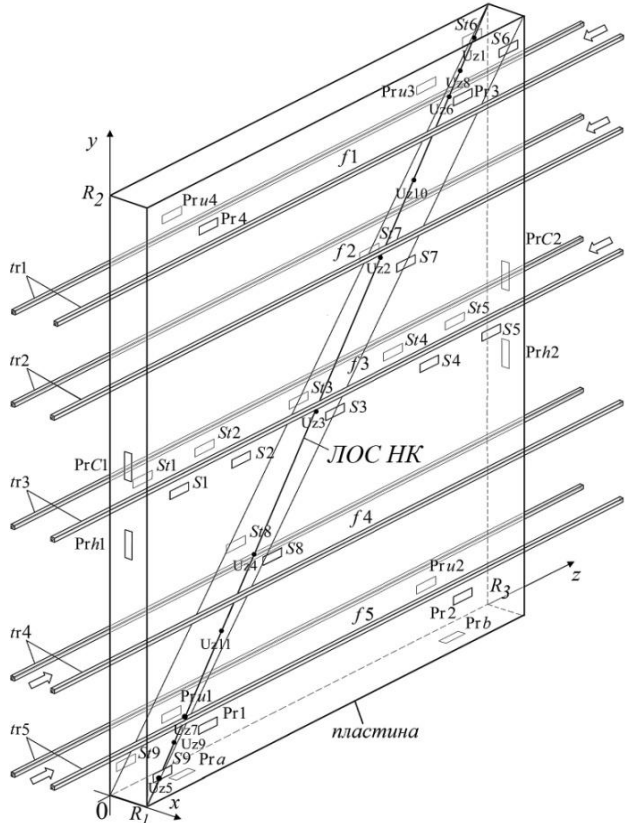


Рисунок 1 – Положение диагональной ЛОС, теплоисточников, ТК и СЖО на НК

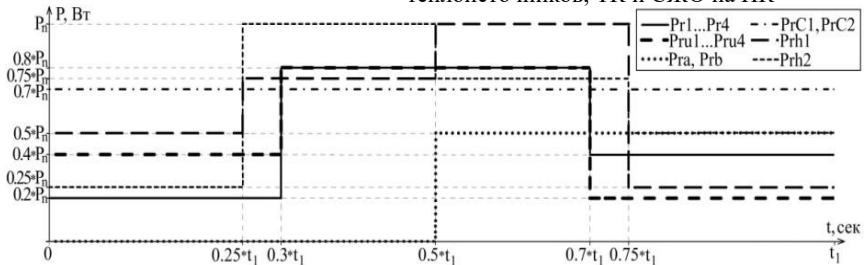


Рисунок 2 – Циклограмма изменения мощности тепловыделения приборов ИИС
Во второй главе сформулирована общая математическая модель (ММ) процесса распространения тепла в НК, имеющей форму пластины (с размерами $R_1 = 0.15$ м, $R_2 = 2.15$ м, $R_3 = 1.97$ м) из анизотропного, в общем случае,

материала с теплофизическими характеристиками: удельная теплоемкость $c_{pl} = 1200 - 1600$ Дж/(кг·°C), плотность материала $\rho = 1300 - 1600$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1.8 - 3.2$ Вт/(м·°C), при температуре среды внутри кожуха (окружающая среда) $T_{sred} = 20$ °C, в форме нелинейной краевой задачи математической физики. На ее основе с помощью обоснованных допущений получена функционально-ориентированная на использование в управлении ММ (ФОМ) температурного поля пластины в виде линейной сопряженной краевой задачи теплопроводности в относительных единицах

$$l_y = y / R_2, \quad l_x = x / R_2, \quad l_z = z / R_2, \quad \theta_{pl} = (T_{pl} - T^*) / T^* :$$

$$\frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial \phi} = \frac{\partial^2 \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x^2} + \frac{\partial^2 \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y^2} + \frac{\partial^2 \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z^2} \quad (1)$$

$$0 < l_v < R_1 \cdot R_2^{-1}, \quad 0 < l_v < 1, \quad 0 < l_v < R_2 \cdot R_3^{-1}, \quad \phi \in (0; \infty)$$

$$\theta_{pl}^0(l_x, l_y, l_z, 0) = (T_{pl}^0 - T^*) \cdot T^{*-1} \quad (2)$$

$$-\left. \frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x} \right|_{l_x=0} = Q_{pl}^{\xi_{lx}0}(l_y, l_z, \phi), \quad -\left. \frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_x} \right|_{l_x=R_1 \cdot R_2^{-1}} = Q_{pl}^{\xi_{lx}1}(l_y, l_z, \phi) \quad (3)$$

$$-\left. \frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y} \right|_{l_y=0} = Q_{pl}^{\xi_{ly}0}(l_x, l_z, \phi), \quad -\left. \frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_y} \right|_{l_y=1} = Q_{pl}^{\xi_{ly}1}(l_x, l_z, \phi) \quad (4)$$

$$-\left. \frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z} \right|_{l_z=0} = Q_{pl}^{\xi_{lz}0}(l_x, l_y, \phi), \quad -\left. \frac{\partial \theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)}{\partial l_z} \right|_{l_z=R_2 \cdot R_3^{-1}} = Q_{pl}^{\xi_{lz}1}(l_x, l_y, \phi) \quad (5)$$

$$Q_{pl}^{\xi_{lx}0}(l_y, l_z, \phi) = q_{\xi_{lx}0}^{pl} + \sum_{N=1}^{N_{Pr}} q_{\xi_{lx}0}^{Pr} V_{\xi_{lx}0}^{Pr} (l_y, l_z) + \sum_{i=1}^{N_{lr}} q_{\xi_{lx}0}^{fi} V_{\xi_{lx}0}^{fi} (l_y, l_z) + \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} q_{\xi_{lx}0}^{stgs} V_{\xi_{lx}0}^{stgs} (l_y, l_z)$$

$$Q_{pl}^{\xi_{lx}1}(l_y, l_z, \phi) = q_{\xi_{lx}1}^{pl} + \sum_{N=1}^{N_{Pr}} q_{\xi_{lx}1}^{Pr} V_{\xi_{lx}1}^{Pr} (l_y, l_z) + \sum_{i=1}^{N_{lr}} q_{\xi_{lx}1}^{fi} V_{\xi_{lx}1}^{fi} (l_y, l_z) + \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} q_{\xi_{lx}1}^{stgs} V_{\xi_{lx}1}^{stgs} (l_y, l_z)$$

$$Q_{pl}^{\xi_{ly}0}(l_x, l_z, \phi) = q_{\xi_{ly}0}^{pl} + \sum_{M=1}^{M_{Pr}} q_{\xi_{ly}0}^{Pr} V_{\xi_{ly}0}^{Pr} (l_x, l_z), \quad Q_{pl}^{\xi_{ly}1}(l_x, l_z, \phi) = q_{\xi_{ly}1}^{pl}$$

$$Q_{pl}^{\xi_{lz0}}(l_x, l_y, \phi) = q_{\xi_{lz0}}^{pl} + \sum_{K=1}^{K_{Pr}} q_{\xi_{lz0}}^{Pr K} V_{\xi_{lz0}}^{Pr K}(l_x, l_y), \quad Q_{pl}^{\xi_{lz1}}(l_x, l_y, \phi) = q_{\xi_{lz1}}^{pl} + \sum_{K=1}^{K_{Pr}} q_{\xi_{lz1}}^{Pr K} V_{\xi_{lz1}}^{Pr K}(l_x, l_y)$$

Здесь: $Q_{pl}^{\kappa 2}$ – суммарные тепловые потоки на гранях $\kappa 2$ НК; $\kappa 2 = \xi_{lx}, \xi_{ly}, \xi_{lz}$ – обозначение граней $\xi_{lx} = \xi_{lx0}$ ($l_x = 0$), $\xi_{lx} = \xi_{lx1}$ ($l_x = R_1 \cdot R_2^{-1}$), $\xi_{ly} = \xi_{ly0}$ ($l_y = 0$), $\xi_{ly} = \xi_{ly1}$ ($l_y = 1$), $\xi_{lz} = \xi_{lz0}$ ($l_z = 0$), $\xi_{lz} = \xi_{lz1}$ ($l_z = R_3 \cdot R_2^{-1}$) пластины соответственно; $\phi = (a \cdot t) / R_2^2$ – число Фурье; $a = \lambda \cdot (c_{pl} \cdot \rho)^{-1}$ – коэффициент температуропроводности; $q_{\kappa 2}^{Pr \iota 1}$, $V_{\kappa 2}^{Pr \iota 1}$ – тепловой поток $\iota 1$ -го тепловыделяющего прибора ИИС на грань $\kappa 2$ пластины и функция, определяющая на ней его местоположение; $q_{\xi_{lx}}^{stgs N_s}$, $V_{\xi_{lx}}^{stgs N_s}$ – управляемый тепловой поток N_s -го ТН на грани ξ_{lx} пластины и функция, определяющая на ней его местоположение; $q_{\xi_{lx}}^{fi}$, $V_{\xi_{lx}}^{fi}$ – потоки теплообмена fi -ой области контакта стенки ТР СЖО и граней $\xi_{lx} = \xi_{lx0}$, $\xi_{lx} = \xi_{lx1}$ пластины и функция, определяющая местоположение указанной области; $\theta_{sred} = (T_{sred} - T^*) / T^*$, $T^* = T_{sred}$, $Bi = Bio / T^*$, $Bio = \alpha \cdot R_2 / \lambda$ – критерий Био; $q_{\xi_{lx}}^{fi} = K_l \cdot q_{\xi_x}^{fi}$, $q_{\kappa 2}^{Pr \iota 1} = K_l \cdot q_{\kappa 1}^{Pr \iota 1}$, $q_{\xi_{lx}}^{stgs N_s} = K_l \cdot q_{\xi_x}^{stgs N_s}$, $K_l = R_2 / (\lambda \cdot T^*)$; $q_{\kappa 2}^{pl} = Bi(\theta_{sred}(\phi) - \theta_{pl}(l_{\kappa 2}, \phi))$, $l_{\xi_{lx}} = (l_y, l_z)$, $l_{\xi_{ly}} = (l_x, l_z)$, $l_{\xi_{lz}} = (l_x, l_y)$.

В диссертации используется явная форма ФОМ в виде: аналитического решения соответствующих краевых задач при принятых допущениях линейности задачи и изотропности материала; передаточных функций (ПФ) объекта управления (ОУ) и их конечномерных аппроксимаций; численного решения в программной среде ANSYS уточненных краевых задач без некоторых допущений, необходимых для аналитического решения и получения ПФ. Решение $\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$ трехмерной краевой задачи (1)-(5) в соответствии с принципом суперпозиции рассматривается как сумма температурных компонент:

$$\theta_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi) = \tilde{\theta}_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi) + \theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi) + \theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi) + \theta_{pl}^f(l_x, l_y, l_z, \phi) \quad (6)$$

$\tilde{\theta}_{pl}(l_x, l_y, l_z, \phi)$ – температурная компонента, учитывающая внешний теплообмен со средой при нулевых потоках от теплоисточников ($q_{\kappa 2}^{ist O} = 0$) и отсутствии воздействия СЖО ($q_{\xi lx}^f = 0$); $\theta_{srce}(l_x, l_y, l_z, \phi)$ – температурная компонента, определяющая воздействие теплоисточников (от приборов ИИС и ТН) при отсутствии внешнего теплообмена пластины со средой ($q_{\kappa 2}^{pl} = 0$) и отсутствии воздействия СЖО на границах пластины ($q_{\xi lx}^f = 0$); $\theta_{pl0}^{(3)}(l_x, l_y, l_z, \phi)$ – температурная компонента, учитывающая начальную температуру пластины; $\theta_{pl}^f(l_x, l_y, l_z, \phi)$ – температурная компонента, определяющая воздействие ТР tr1...tr5 на области контакта f1...f5 с пластиной при $q_{\kappa 2}^{ist O} = 0$ и $q_{\kappa 2}^{pl} = 0$. ФОМ в форме краевой задачи (1)-(5), позволяет с помощью соответствующих функций Грина и конечных интегральных преобразований построить структурную схему ОУ для любых точек $M^*(l_x, l_y, l_z)$ НК и точек $M^{**}(l_x^*, l_y^*, l_z^*)$ диагональной ЛОС (рисунок 3).

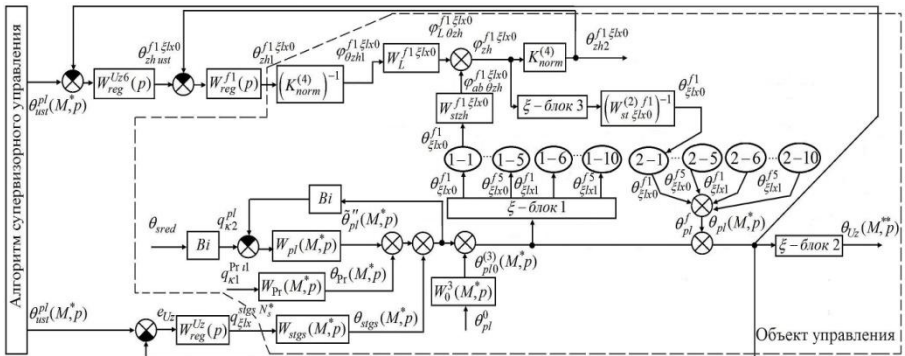


Рисунок 3 – Структурная схема САУ температурным распределением ЛОС НК

Структурная схема ОУ содержит в качестве подсистем:

- 1) $W_{pl}(M^*, p)$ – распределенную ПФ, выходом которой является трехмерное распределение температуры $\tilde{\theta}_{pl}(M^*, p)$ в пластине при ГУ-2 при нулевых НУ:

$$W_{pl}(M^*, p) = W_{pl}^{lx}(l_x, p) + W_{pl}^{ly}(l_y, p) + W_{pl}^{lz}(l_z, p) \quad (7)$$

Например, ПФ по l_x : $W_{pl}^{lx}(l_x, p) = W_{pl}^{\xi_{lx0}}(l_x, \xi_{lx0}, p) + W_{pl}^{\xi_{lx1}}(l_x, \xi_{lx1}, p)$, где:

$$W_{pl}^{\xi_{lx}}(l_x, \xi_{lx}, p) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n^*(\mu_n, p) \varphi_n(\mu_n, l_x) \varphi_n(\mu_n, \xi_{lx}) r(\xi_{lx}) = R_2 / (R_1 \cdot p) +$$

$$+ 2 \frac{R_2}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \frac{R_2 l_x}{R_1}) \cos(\pi n \frac{R_2 \xi_{lx}}{R_1}) \frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} / (\frac{R_1^2}{R_2^2 \pi^2 n^2} p + 1) \text{ содержит}$$

собственные функции φ_n и собственные числа μ_n , и представляет собой интегрирующее и бесконечное число аperiodических звеньев.

2) $W_{srce}(M^*, p)$ – ПФ, выходом которой является трехмерное распределение температуры $\theta_{srce}(M^*, p)$. $W_{srce}(M^*, p)$ – сумма тепловыделений приборов ИИС, работающих по циклограммам (рисунок 2) – ПФ $W_{Pr}(M^*, p)$ и ТН – ПФ $W_{stgs}(M^*, p)$:

$$W_{srce}(M^*, p) = W_{Pr}(M^*, p) + W_{stgs}(M^*, p) = [\sum_{N=1}^{N_{Pr}} W_{PrN}^{\xi_{lx0}}(M^*, p) +$$

$$+ \sum_{N=1}^{N_{Pr}} W_{PrN}^{\xi_{lx1}}(M^*, p) + \sum_{M=1}^{M_{Pr}} W_{PrM}^{\xi_{ly0}}(M^*, p) + \sum_{K=1}^{K_{Pr}} W_{PrK}^{\xi_{lz0}}(M^*, p) +$$

$$+ \sum_{K=1}^{K_{Pr}} W_{PrK}^{\xi_{lz1}}(M^*, p)] + [\sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} W_{stgsN_s}^{\xi_{lx0}}(M^*, p) + \sum_{N_s=1}^{N_{stgs}} W_{stgsN_s}^{\xi_{lx1}}(M^*, p)]$$
(8)

Здесь: $W_{istO}^{\kappa_2}(M^*, p) = W_{istO}^{\kappa_2}(M^*, p, M^{**}, \mu_n, \psi_m, \gamma_k, R_1, R_2, R_3)$ – распределенные ПФ влияния соответствующих тепловыделяющих приборов ИИС и ТН, размещенных на гранях κ_2 НК в ограниченных прямоугольных областях контакта, с учетом того, что эти ПФ получены преобразованием по Лапласу соответствующих функций Грина краевой задачи с ГУ-2, они имеют форму суммы интегрирующего и бесконечной суммы аperiodических звеньев:

$W_{istO}^{\kappa_2}(M^*, p) = K_1 / p + \sum_{klv=2}^{\infty} K_{klv} / (T_{klv} p + 1)$ с соответствующими коэффициентами и постоянными времени, зависящими от координат точек контроля M^{**} . Здесь ist – тип теплоисточника, O – номер теплоисточника, если $ist = Pr$, $O = \iota 1, \iota 1 = N, M, K$ – номер тепловыделяющего прибора ИИС, если $ist = stgs$, то $O = N_s$, N_s – номер ТН.

3) Начальная температура пластины θ_{pl}^0 учитывается в структурной

схеме через ПФ $W_0^{(3)}(M^*, p)$, определяющую $\theta_{pl0}^{(3)}(M^*, p)$:

$$W_0^{(3)}(M^*, p) = W_0^{(3)}(l_x, \xi_{lx}, p) + W_0^{(3)}(l_y, \xi_{ly}, p) + W_0^{(3)}(l_z, \xi_{lz}, p) \quad (9)$$

Например, для одномерной задачи по оси l_x :

$$W_0^{(3)}(l_x, \xi_{lx}, p) = \frac{R_2}{R_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n \cos(\eta_n R_2 \cdot R_1^{-1} l_x)}{\eta_n + \sin(\eta_n) \cdot \cos(\eta_n)} \sin(\eta_n) \frac{R_1^2 \cdot (R_2^2 \eta_n^2)^{-1}}{R_1^2 \cdot (R_2^2 \eta_n^2)^{-1} p + 1},$$

где η_n – собственные числа краевой задачи с ГУ-3.

4) ξ -блок 1 переводит непрерывное температурное распределение пластины $\theta_{pl}(M^*, p)$ в $j = 1, J_d$ дискретных значений температуры $\theta_{\xi_{lx} 1}^{fi}, \dots, \theta_{\xi_{lx} J_d}^{fi}$ на гранях пластины ξ_{lx} , контактирующих с областями ТР на участках дискретизации $(a_1, b_1), \dots, (a_{J_d}, b_{J_d})$. Кружками 1-1...1-5 отражен теплообмен грани ξ_{lx0} пластины с ТР tr1...tr5, в кружках 1-6...1-10 аналогично – для грани ξ_{lx1} . Кружками 2-1...2-5 отражен теплообмен боковой поверхности ТР tr1...tr5 с гранью ξ_{lx0} и соответственно в кружках 2-6...2-10 – для грани ξ_{lx1} . ξ -блок 2 осуществляет выборку из температурного распределения $\theta_{pl}(M^*, p)$ температур $\theta_{Uz}(M^{**}, p)$ фиксированных точек $M^{**}(l_x^*, l_y^*, l_z^*) \in M^*(l_x, l_y, l_z)$ диагональной ЛОС НК.

5) ПФ теплообмена между НК и ТР СЖО:

$$W_{stzh}^{fi \xi_{lx}}(L, p) = \sum_{j=1}^{J_d} e(-S_{tube} \rho_{zh} L \cdot p / M) \cdot W_{st j}''(p) \cdot [(S_{tube} \rho_{zh} c_{zh} p)^{-1} \cdot \quad (10)$$

$$\cdot (e(S_{tube} \rho_{zh} b_j \cdot p / M) - e(S_{tube} \rho_{zh} a_j \cdot p / M)) - (b_j - a_j) / (Mc_{zh})]$$

$$W_L^{fi \xi_{lx}}(L, p) = \exp(-T_d(L)p) \quad (11)$$

$$W_{st \xi_{lx}}^{(2) fi} = \sum_{j=1}^{J_d} \varphi_{qd j}^{fi \xi_{lx}} / \theta_{\xi_{lx} j}^{fi} = \sum_{j=1}^{J_d} (W_{r1} G_1 K_{norm}^{(1)}) / (1 \pm W_{r1} G_1^2 W_{r2}) \quad (12)$$

$W_{stzh}^{fi \xi_{lx}}$ – определяет влияние на относительную температуру жидкостного теплоносителя $\varphi_{ab \theta_{zh}}^{fi \xi_{lx}}$ fi-ой ТР температуры $\theta_{\xi_{lx} 1}^{fi}, \dots, \theta_{\xi_{lx} J_d}^{fi}$ в дискретных областях на гранях ξ_{lx} пластины; $W_L^{fi \xi_{lx}}$ – определяет температуру теплоносителя $\varphi_{L \theta_{zh}}^{fi \xi_{lx}}$ fi-ой ТР на гранях ξ_{lx} , входом которой является $\varphi_{\theta_{zh} 1}^{fi \xi_{lx}}$, без

учета температурного влияния пластины; $T_d = L / v_{zh}$, L – длина ТР, v_{zh} – скорость теплоносителя; δ_{st} , c_{st} , λ_{st} , ρ_{st} – толщина, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, плотность материала стенки ТР; S_{tube} – площадь внутреннего сечения ТР; M , c_{zh} , λ_{zh} , ρ_{zh} – массовый расход, удельная теплоемкость, теплопроводность, плотность теплоносителя; $K_{norm}^{(1)}$, $K_{norm}^{(4)}$ – нормирующие коэффициенты для согласования относительных переменных $\theta_{zh}^{\tilde{f} \xi_{lx}}$, θ_{st1} и q с $\varphi_{\theta_{zh}}^{\tilde{f} \xi_{lx}} = (T_{zh}^{\tilde{f} \xi_x} - T_{zh0}^{\tilde{f} \xi_x}) / (T_{zh0}^{\tilde{f} \xi_x} - T^*)$, $\varphi_{\theta_{st1}} = (T_{pl} |_{x=0, x=R_1} - T_{zh0}^{\tilde{f} \xi_x}) / (T_{zh0}^{\tilde{f} \xi_x} - T^*)$ и $\varphi_q = (q - q_0) / q_0$, связывающих базовую температуру T^* с начальной температурой теплоносителя $T_{zh0}^{\tilde{f} \xi_x}$ и начальным потоком ТР q_0 , $W_{r1}(p) = -\chi_1 / (1 + \chi_1 G_3) = \varphi_{q1} / \varphi_{\theta_{st1}}$,

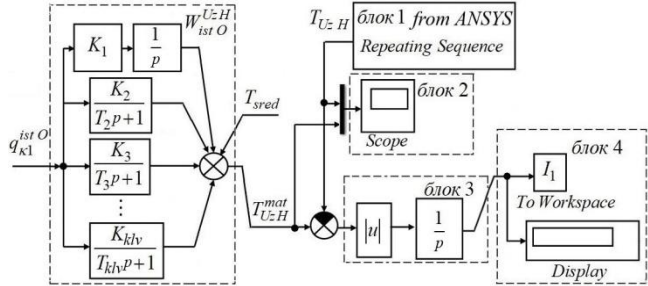
$$W_{r2}(p) = \chi_2^{-1} / (1 + G_2 / \chi_2) = \varphi_{\theta_{st2}} / \varphi_{qd}, G_1(p) = 1 / ch\sqrt{p}, G_2(p) = \sqrt{p} th\sqrt{p}, G_3(p) = th\sqrt{p} / \sqrt{p}, \chi_1 = 1, \chi_2 = \alpha \cdot \delta_{st} / \lambda_{st},$$

$$W_{stj}''(p) = \varphi_{qdj}^{\tilde{f} \xi_{lx}}(p) / \theta_{\xi_{lx}j}^{\tilde{f}}(p) = (W_{r1} G_1 K_{norm}^{(1)}) / (1 \pm W_{r1} G_1 W_{r2}).$$

ξ -блок 3 осуществляет выборку температур областей контакта fl...f5 пар ТР tr1...tr5, которые через ПФ $(W_{stj}^{(2) \tilde{f}})^{-1}$ изменяют температуру пластины в области ее контакта с внешними стенками ТР, аппроксимированной J_d участками.

В диссертации решена задача идентификации параметров ПФ ОУ (рисунок 3, (7)-(12)). Процедура параметрической идентификации ПФ ОУ реализована в среде MATLAB

Рисунок 4 – Схема идентификация ПФ W_{istO}^{UzH} с использованием в качестве вычислительного эксперимента результатов конечно-элементного моделирования в ANSYS, на рисунке 4 приведена схема идентификации ПФ W_{istO}^{UzH} воздействия теплоисточников на пластину. Для остальных ПФ процедура идентификации проводится по аналогии.



В ходе идентификации установлено минимально допустимое количество (четыре) учитываемых апериодических звеньев ПФ $W_{ist O}^{UzH}$, параметры ПФ.

Погрешность идентификации не превышает 3%.

В третьей главе разработана супервизорная САУ (рисунке 3), содержащая две основные подсистемы, замкнутые по отклонению управляемой величины:

подсистема управления температурой T_{pl} НК с помощью ТН и подсистема

управления температурой $T_{zh1}^{fi \xi x}$ теплоносителя в ТР СЖО. Сформулирована задача разработки САУ температурным распределением на ЛОС НК для базового АО: перевести ОУ (7)-(12) из начального состояния T_{pl}^0 в требуемое конечное T_{ust}^{pl} в условиях:

1. Ограничений на управляющие воздействия:

$$P_{min}^{stgs} \leq P_{stgs N_s} \leq P_{max}^{stgs}, \quad T_{min}^{zh} \leq T_{zh1}^{fi \xi x} \leq T_{max}^{zh},$$

1.1. Управляющим воздействием является поток $q_{\xi x}^{stgs N_s} = P_{stgs N_s} / S_{N_s}$ ТН на гранях ξ_x НК. Значения этих потоков определяются соответствующими мощностями $P_{stgs N_s}$ тепловыделения ТН, дискретно распределенных по поверхности НК в окрестности $V_{\xi x}^{stgs N_s}$. Для выбранных типов АО $P_{min}^{stgs} = 0$ Вт, $P_{max}^{stgs} = 40$ Вт. Управление осуществляется парами ТН в области диагональной ЛОС НК: S6-St6, S7-St7, S3-St3, S8-St8, S9-St9 (рисунок 1).

1.2. Управляющим воздействием СЖО является температура $T_{zh1}^{fi \xi x}$ теплоносителя на входе пар ТР tr1...tr5, причем $T_{min}^{zh} = 10$ °C, $T_{max}^{zh} = 40$ °C.

2. Влияние теплообмена с окружающей средой и тепловыделение приборов ИИС тепловыми потоками на гранях пластины, дискретно распределенных на поверхности НК, изменяющихся в соответствии с циклограммами (рисунок 1), рассматриваются как возмущения.

3. Требования к показателям качества работы САУ: величина статической ошибки результирующих температур в выбранных точках контроля (ТК) диагональной ЛОС НК $\Delta_{ctam} \leq 0.5$ °C, величина динамической ошибки $\Delta_{дин} \leq 2$ °C. Величина перегерулирования $\sigma \leq 30\%$, степень затухания

$\psi_3 \geq 97\%$, время регулирования $t_{nn} \leq 10800$ сек. В качестве заданного значения температуры T_{ust}^{pl} для базового АО принято: $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl1} = 40^\circ \text{C}$ и $T_{ust}^{pl} = T_{ust}^{pl2} = 20^\circ \text{C}$.

Для каждой ТК диагональной ЛОС НК можно рассматривать приведенную одноконтурную САУ, где воздействия со стороны смежных локальных САУ, внешней среды при синтезе регулятора считаются возмущениями. Для оптимальной параметрической настройки регуляторов $W_{reg}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) = K_{\Pi} + K_{\Pi} / j\omega + K_{\text{д}} \cdot j\omega$ используется альтернансный метод Э.Я. Рапопорта. С учетом требований к качеству процесса регулирования, формируемых в частотной области в виде соответствующих требований к показателю колебательности $M^{\psi_3}(\psi_3)$, минимаксная задача оптимизации:

$$\max_{\omega \in [0; \infty)} \left| W_{vk}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \right| \rightarrow \min, \max_{\bar{K} \quad \omega \in [0; \infty)} \left| W_{uk}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \right| \leq M^{\psi_3}, \text{ сводится к решению}$$

замкнутой системы уравнений относительно параметров $\bar{K} = (K_{\Pi}, K_{\text{д}}, K_{\text{д}})$.

$W_{vk}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) = \left| W_v^{UzH}(j\omega) / (1 + W_{reg}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \cdot W_u^{UzH}(j\omega)) \right|$, $W_{uk}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) = | (W_{reg}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \cdot W_u^{UzH}(j\omega)) / (1 + W_{reg}^{UzH}(j\omega, \bar{K}) \cdot W_u^{UzH}(j\omega)) |$ – АЧХ приведенной одноконтурной локальной САУ по каналу возмущения и по каналу управляющего воздействия соответственно, $W_u^{UzH}(s)$, $W_v^{UzH}(s)$ – приведенные ПФ управления и ПФ возмущений. Заданные температурные кондиции на диагональной ЛОС НК обеспечиваются с помощью управления температурой ТК (рисунок 1) путем изменения мощности $P_{stgs N_s}$ от пар ТН (согласно ПИ-закону управления,

$K_{\text{д}} = 0$) и ТР СЖО (согласно ПИД-закону управления) в диагональных ТК

UzH , $H = 1, 7$: S6, St6 для ТК Uz1; tr1 для ТК Uz6; S7, St7, tr2 для ТК Uz2; S3, St3, tr3 для ТК Uz3; S8, St8, tr4 для ТК Uz4; tr5 для ТК Uz7; S9, St9 для ТК Uz5. Управление температурой ТК с помощью ТР СЖО осуществляется парами ТР tr1 и tr5. Используются также дополнительные ТК Uz8...Uz11. Структурные схемы САУ температурой в ТК Uz1, Uz6 и результаты моделирования их работы при $T_{pl}^0 = 40^\circ \text{C}$, $T_{sred} = 20^\circ \text{C}$, $T_{ust}^{pl} = 40^\circ \text{C}$ представлены на рисунках (5-7). На рисунке 6, в кружке с цифрой 1 – управляющий сигнал от регулятора САУ температурой ТК Uz1.

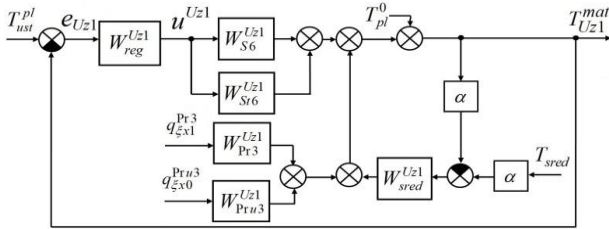


Рисунок 5 – Структурная схема локальной САУ температурой в ТК Uz1

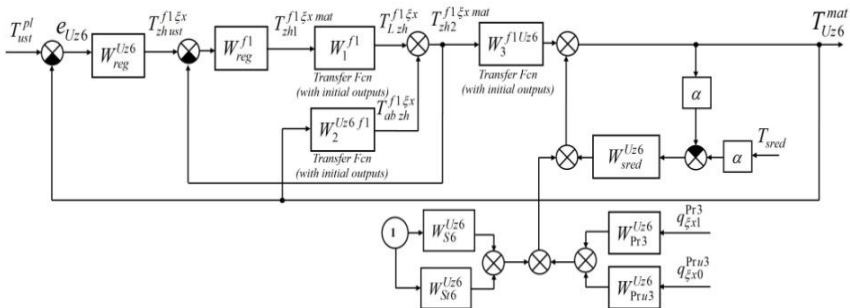


Рисунок 6 – Структурная схема локальной САУ температурой в ТК Uz6

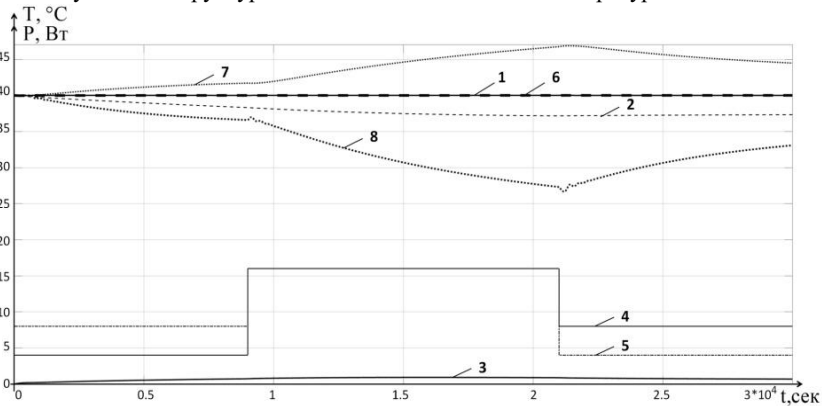


Рисунок 7 – Результат моделирования локальной САУ температурой в ТК Uz1 и Uz6
 1 – температура в ТК Uz1 при автоматическом управлении, °C; 2 – температура в ТК Uz1 без управления, °C; 3 – мощность ТН СТГС S6 и St6, Вт; 4 – циклограмма изменения мощности тепловыделения Pr3, Вт; 5 – циклограмма изменения мощности тепловыделения Pru3, Вт; 6 – температура в ТК Uz6 при автоматическом управлении, °C; 7 – температура в ТК Uz6 без управления, °C; 8 – температура теплоносителя на входе пар TP tr1, °C;

В четвертой главе уточнены и скорректированы результаты аналитического моделирования ОУ и синтеза на основе этой модели системы управления.

Для автоматизации сопряженных расчетов использован программный пакет ANSYS Workbench. Алгоритм численного моделирования включает в себя последовательность шагов, выполняемых в разработанном макросе на языке

Python. Вычислительный эксперимент №1 проведен для данных $T_{pl}^0 = 40^\circ\text{C}$,

$T_{ust}^{pl} = 40^\circ\text{C}$, эксперимент №2 проведен для данных $T_{pl}^0 = 10^\circ\text{C}$, $T_{ust}^{pl} = 20^\circ\text{C}$,

при $T_{sred} = 20^\circ\text{C}$, $t_1=30000$ сек., шаг по времени 500 сек. На рисунках 8-10 представлены значения мощности ТН, температура на входе ТР и динамика температуры в соответствующих ТК, график температур на диагональной ЛОС НК для двух вычислительных экспериментов при $t=25000$ сек. представен на рисунке 11 (линия 1 – с управлением, линия 2 – без управления).

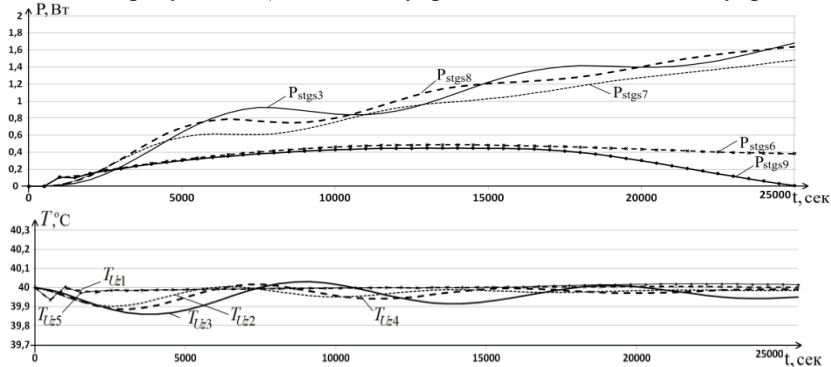


Рисунок 8 – Мощность ТН и температура ТК (вычислит.эксперимент №1)

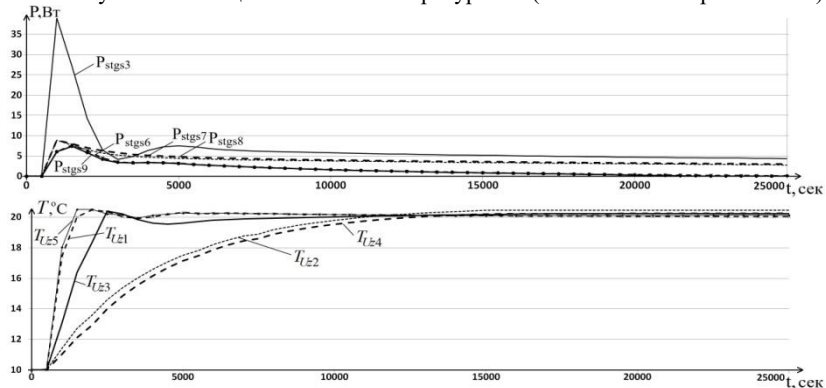


Рисунок 9 – Мощность ТН и температура ТК (вычислит. эксперимент №2)

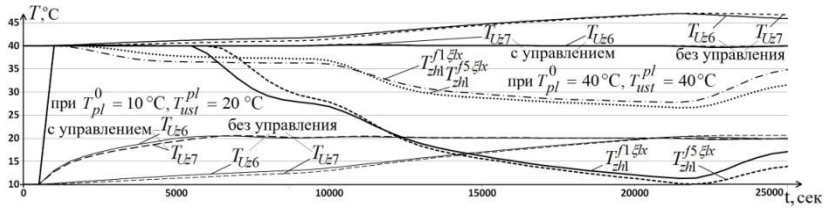


Рисунок 10 – Температура теплоносителя на входе ТР и в ТК Uz6 и Uz7

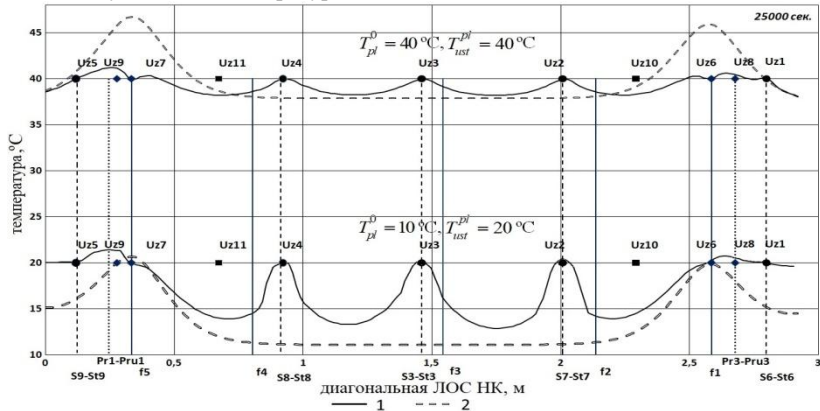


Рисунок 11 – Температура на диагональной ЛОС НК

Полученные результаты вычислительных экспериментов показывают, что показатели качества работы САУ лежат в установленных пределах, что подтверждает эффективность выбранного алгоритма управления. Разработанную систему управления температурным режимом НК предложено реализовать с помощью современных средств промышленной автоматизации. Выбор этих средств определяется массогабаритными ограничениями и областью использования АО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в диссертационном исследовании цели достигнуты. Установлено, что:

1. Повышенная значимость информации ИИС АО и высокая степень риска от ее искажения из-за температурной компоненты погрешности определяют актуальность диссертационного исследования. Несмотря на большое количество исследований в области теплопередачи и управления температурным состоянием объектов промышленной теплофизики, проблему повышения эффективности функционирования АО путем снижения термодифференциальной погрешности ИИС в условиях воздействия неравномерных и нестационарных тепловых нагрузок к настоящему времени нельзя считать эффективно решенной.

2. Предложена и апробирована методика математического моделирования распределения температуры в НК АО в условиях нестационарного и неравномерного воздействия на нее локально-распределенного тепловыделения аппаратуры ИИС и внешних тепловых воздействий. Обоснованы и поставлены в качестве неявной функционально-ориентированной на использование в управлении ММ сопряженные краевые теплогидравлические задачи, описывающие процессы теплопроводности в НК и ее теплообмен с СЖО. Получено решение поставленных сопряженных краевых задач математической физики, представляющее собой явную форму ФОМ температурного распределения в НК. Методами конечных интегральных преобразований с использованием функции Грина получены распределенные ПФ температурного распределения от дискретно-распределенных теплоисточников в НК. Получены и приведены к дробно-рациональному виду ПФ процесса теплообмена СЖО и НК. Получена структурная форма описания температурного распределения в НК как распределенного ОУ.

3. Проведена параметрическая идентификация ОУ с использованием вычислительного эксперимента на конечно-элементной модели в программной среде ANSYS. В ходе параметрической идентификации установлено минимально необходимое число параметров аппроксимации ПФ ОУ и уточнены значения параметров ПФ, составляющих структуру ОУ. Предложена структура САУ температурным распределением на диагональной ЛОС НК АО. Выбрана структура и проведен параметрический синтез параметров регуляторов САУ, обеспечивающих требуемые динамические и статические показатели качества.

4. В программной среде MATLAB смоделирована работа САУ в условиях типовых возмущений. В ходе моделирования установлено, что показатели качества разработанной САУ удовлетворяют техническим требованиям.

5. Разработан в программной среде ANSYS алгоритм моделирования и расчетно-имитационная конечно-элементная модель управляемого сопряженного теплогидравлического температурного распределения в несущей конструкции, пригодная для уточненных расчетов параметров процесса нагрева и охлаждения конструкции и параметрической идентификации этого процесса. Имитационное моделирование в программной среде ANSYS синтезированной САУ температурой диагональной ЛОС НК подтвердило ее эффективность.

6. Предложен комплекс технических средств для реализации разработанной САУ на базовом АО.

7. Разработанная САУ компенсирует нестационарные и неравномерные возмущения температуры НК со стороны тепловыделяющей аппаратуры бортовой ИИС и внешней среды, уменьшая до требуемого уровня термоградиентную компоненты погрешности ИИС. Разработанный алгоритм моде-

лирования САУ в среде ANSYS может быть использован при синтезе САУ в бортовых контроллерах АО различных типов, а также при стендовых испытаниях различного назначения. Материалы диссертационного исследования могут быть использованы при моделировании, проектировании различных процессов технологической теплофизики, а также при создании САУ ОРП различной физической природы.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в расчетно-проектную практику на предприятиях ООО «СКТБ «Пластик», АО «ТЯЖМАШ», АО «Сызранский НПЗ» и использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ».

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в международной наукометрической базе SCOPUS

1. Saveliyeva Yu.O., Michael Livshits, Igor Adeyanov, Ivan Danilushkin Thermogradient dimensional stabilization of eddential cross-sections of the carrying structure of an autonomous object. Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Vo.342. 2020, Pp.17-32. Scopus, Springer.

2. Livshits M.Yu., Borodulin B.B., Saveliyeva Yu.O., Nenashev A.V. Distributed control of temperature regimes for structure elements of autonomous objects". 2019. IEEE Xplore Digital Library. Scopus. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976547

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

3. Савельева Ю.О. Учет температурных потерь конструкции автономного объекта при взаимодействии с окружающей средой в задаче термостабилизации. Электронный журнал Cloud of Science <http://cloudofscience.ru>. ISSN 2409-031X. 2020. Т. 7, №2. С.334-346.

4. Савельева Ю.О. Моделирование процесса оптимального управления системой с распределенными параметрами. Научный журнал Вестник НГИЭИ. №1(92). Княгино, 2019. С.5-15.

5. Савельева Ю.О. Решение задач оптимального управления системами с сосредоточенными параметрами. Научный журнал Вестник НГИЭИ. 2018. №11(90). С.77-86. ISSN 2227-9407.

Публикации в других изданиях

6. Савельева Ю.О., Лившиц М.Ю., Адеянов И.Е., Данилушкин И.А. Термоградиентная размерная стабилизация ответственных сечений несущей конструкции автономного объекта. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т.2. С.79-87.

7. Савельева Ю.О. К вопросу применения вычислительных алгоритмов альтернансного метода в задачах оптимизации систем с распределенными параметрами. Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики.

Материалы XVI Международной научно-практической конференции: в 2 т. Том 1. Гуманитарные и социальные науки, образование. Актуальные проблемы информатизации науки и производства. Актуальные проблемы экологии и охраны окружающей среды. Тольятти. 2019 г. С.161-168.

8. **Савельева Ю.О.** Синтез оптимального управления температурным полем объекта в условиях интервальной неопределенности. «Молодежная наука: вызовы и перспективы»: II Всероссийская научно-практическая конференция. Отв. Редактор О.В. Карсунцева. Самара. Самар.гос.техн.ун-т. 2019. С.87-91.

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

Разрешено к печати диссертационным советом

24.2.377.04 (Д 212.217.07)

Протокол №1 от 02.02.2022 г.

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

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

Самарский государственный технический университет

Типография СамГТУ

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