

На правах рукописи



ЛЯШЕНКО Александр Леонидович

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В АКТИВНОЙ ЗОНЕ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ РМБК-1000**

специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный консультант: **Першин Иван Митрофанович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления и информационных технологий Института сервиса, туризма и дизайна (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет».

Официальные оппоненты: **Рапопорт Эдгар Яковлевич**
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Ефимов Николай Николаевич
доктор технических наук, профессор, профессор энергетического факультета ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Пыркин Антон Александрович
доктор технических наук, профессор, декан факультета систем управления и робототехники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»**, 344006 г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

Защита диссертации состоится «17» декабря 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.212.233.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ГУАП». Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://guap.ru>

Автореферат разослан «22» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.01
доктор технических наук, профессор

Д.К. Шелест

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Основным объектом рассмотрения и проведения исследований в работе является энергетическая установка РМБК-1000 Ленинградской АЭС. Как известно, для обеспечения безопасной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) проводится постоянный контроль и диагностика состояния реакторной установки. Активную зону реактора АЭС предлагается рассматривать как объект с распределенными параметрами, а для мониторинга параметров технологического процесса и применять разработанные методы аналитического и неразрушающего контроля, методы системного анализа и обработки информации, а также методы целенаправленного воздействия оперативного персонала на объект управления для осуществления контроля и последующего анализа работы реактора, совершенствования контроля, управления и принятия решений с целью повышения эффективности функционирования реакторной установки и расширении автоматизации технологических процессов.

Технологический процесс в реакторной установке требует обеспечения постоянного контроля температурных полей в активной зоне и поддержания экономайзерной зоны на заданном уровне. Значение тепловых полей является критическим параметром и, как показала практика, их циклическое изменение приводит к возникновению усталости металла в циркониевых трубках, что приводит к их искривлению, появлению трещин и разрывов. Данные дефекты относятся к критичным и приводят к заклиниванию тепловыделяющих сборок (ТВС) в технологическом канале, разгерметизации конструкции и утечки радиоактивного теплоносителя.

Решение данной задачи осуществляется посредством изменения количества теплоносителя, поступающего в технологический канал через запорно-регулирующий клапан (ЗРК), находящиеся в подреакторном помещении с повышенным уровнем радиации. В настоящее время регулирование ЗРК осуществляется вручную. В связи с чем, оперативный персонал (ОП), выполняющий данную процедуру, подвергается излишнему воздействию радиации. Кроме того, наличие человека в контуре управления существенно снижает время принятия решения о выработке управляющего воздействия и его реализации на ЗРК.

Поддержание тепловых полей на заданном уровне по всей протяженности технологического канала (ТК) активной зоны реактора в автоматическом режиме, с учетом выгорания атомного топлива в каждом ТК позволит повысить качество и безопасность работы АЭС в целом и оградить ОП от радиационного излучения.

Применяя методы теории систем с распределенными параметрами (СРП) возможно существенно усовершенствовать контроль параметров, диагностику и управление объектом, так как повышается точность при прогнозировании поведения, моделировании, расчете характеристик рассматриваемой системы. Как следствие получаем увеличение безопасности техногенного объекта и продление срока его службы.

В настоящее время атомная станция является совокупностью различных видов оборудования, представляющего сложную технологическую систему, в которой постоянно протекают сложные процессы, связанные с преобразованием и передачей различных типов энергии. Какие-либо изменения технологических параметров, либо характеристик оборудования в некоторой степени оказывают влияние на параметры системы в целом и на показатели функционирования всей системы. В течение работы термодинамические параметры системы могут меняться в физически возможных границах и технически допустимых изменений параметров энергоносителей и технологических конструкций. Это вызывает необходимость принимать во внимание множество технических ограничений, являющихся необходимыми условиями нормальной работы системы. В настоящее время, приоритетом атомной энергетики является обеспечение и совершенствование мер безопасности. Высокий уровень ответственности сотрудников АЭС при работе с оборудованием, требует принимать во внимание даже самые незначительные риски возможности аварии.

В связи с этим, задачи разработки новых методов и средств контроля, анализа и обработки информации о ходе технологического процесса, и задача разработки новых методов синтеза регуляторов и расчета их настроек для управления сложными системами данного класса и объектами с распределенными параметрами (ОРП) в целом является актуальной.

Объектом исследования в данной работе являются линейные и нелинейные системы контроля и управления энергетической установки.

Предмет исследования – влияние входных параметров и управляющих воздействий на поддержание экономайзерной зоны на заданном уровне, а также на возможность применения в системах контроля с распределёнными параметрами адаптивных алгоритмов на примере активной зоны энергетической установки РМБК-1000 Ленинградской АЭС.

Цель работы и основные задачи. Целью диссертационной работы является развитие и совершенствование методов аналитического и неразрушающего контроля материалов и изделий, а также применение разработанных методов для компенсации возникающих параметрических изменений в рассматриваемых системах, вызванных возмущающими воздействиями..

В соответствии с целью, объектом и предметом исследования намечены следующие задачи:

- произвести анализ состояния проблемы контроля температуры в заданных точках в активной зоне реактора.
- произвести совершенствование методики построения специального математического и алгоритмического обеспечения необходимого для моделирования технологических процессов в активной зоне реактора
- построить математическую модель тепловых процессов, имеющих место в активной зоне.
- разработать программный комплекс для обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля.

- разработать методику расчета параметров передаточных функций распределенных объектов и систем;
- разработать методики синтеза распределенных регуляторов, реализующих различные алгоритмы управления в системах контроля, в том числе и с учетом показателя колебательности.
- произвести совершенствование методики оценки влияния возмущающих воздействий на параметры переходных процессов распределённых систем контроля и управления, и оценки их устойчивости.
- разработать методику расчета адаптивных распределённых систем контроля и управления.
- разработать методическое, техническое и информационное обеспечение для локальных систем мониторинга техногенных объектов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач и проведения теоретических исследований использовались методы теории автоматического управления, методы контроля технологических параметров, методы решения уравнений математической физики, методы теории функций комплексного переменного, методы теории систем с распределенными параметрами, а также методы программирования с применением языков программирования Borland Pascal и C++.

Достоверность полученных результатов исследований и обоснованность научных положений подтверждается идентичностью результатов теоретических исследований, вычислительных экспериментов, компьютерного моделирования замкнутых систем контроля и управления температурой в активной зоне с результатами, полученными в информационно-управляющей системы «Скала-микро», работающей на объекте исследования.

Научная новизна и теоретическая значимость исследования:

- В работе предложен новый метод частотного анализа активной зоны атомного реактора как объекта, характеризующегося распределённостью параметров.
- Разработаны методики контроля тепловых полей в активной зоне реактора.
- Разработана методика неразрушающего контроля технологических параметров техногенного объекта.
- Разработано алгоритмическое обеспечение обработки информационных сигналов, поступающих от средств контроля параметров технологического процесса.
- Разработано программное обеспечение процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в средствах контроля.
- Разработаны методики синтеза адаптивной системы контроля и управления объектами, на примере атомного реактора.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методы контроля уровня экономайзерной зоны в реакторной установке.

2. Математические модели контролируемых температурных полей активной зоны реактора.

3. Методики мониторинга и анализа состояния активной зоны реактора с помощью расширенных частотных характеристик;

4. Методики автоматизации производственных процессов с применением распределенных регуляторов.

5. Вычислительные алгоритмы и пакеты прикладных программ для мониторинга параметров в активной зоне реактора, анализа систем и расчета настроек регуляторов выбранного типа для управления объектом рассматриваемого класса.

Практическая ценность работы.

1. Разработанные методики позволяют осуществлять непрерывный мониторинг теплофизических параметров теплоносителя в технологических каналах реактора, производить контроль тепловых полей в активной зоне, а также осуществлять управление уровнем экономайзерной зоны.

2. Полученные результаты диссертационного исследования могут быть использованы при разработке запорно-регулируемых клапанов для контроля и регулирования расхода теплоносителя в реакторных установках канального типа, а также для разработки систем управления к ним.

3. Полученные результаты могут быть учтены при модернизации реакторных установок типа РМБК-1000.

4. Положения и результаты диссертационной работы внедрены в проектную и научную деятельность Научно - внедренческого центра Международного исследовательского института.

5. Созданный пакет прикладных программ позволяет реализовать методы и алгоритмы прогнозирования, оценки эффективности и надежности, а также производить синтез систем управления с распределенными параметрами рассматриваемого класса объектов.

Реализация результатов исследования.

Прикладные и научные результаты, полученные в диссертации, применяются в учебном процессе:

- кафедра «Конструирование и технологий электронных и лазерных средств» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»;

- кафедра «Управления в технических системах» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»;

- кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств» Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна;

- кафедра «Информационно-измерительных технологий и систем управления» Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна;

- кафедра «Управление в технических системах» Северо-Кавказского федерального университета.

Публикации и апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии» (Санкт-Петербург – 2003); Всероссийской научной конференции «Управление и информационные технологии» (Пятигорск – 2004); Международная научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (Пятигорск – 2006); Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию СЗТУ «Системы и процессы управления и обработки информации» (Санкт-Петербург – 2010); Научной конференции «Управление и информационные технологии» ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (Санкт-Петербург – 2010); Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления (Санкт-Петербург – 2011); Международной конференции «Современные телекоммуникационные системы и компьютерные сети: перспективы развития» (Санкт-Петербург – 2011); Первом национальном научном форуме «Нарзан-2011» (Кисловодск – 2011); Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (Таганрог – 2011); Международной Четаевской конференции. (Казань – 2012); Международной научно-практической конференция «Технические науки – основа современной инновационной системы» (Йошкар-Ола – 2012); Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и её приложения» (Пятигорск – 2012); Всероссийской научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах» (Санкт-Петербург – 2012); Всероссийской научно-практической конференции РАН (Москва – 2013); Втором национальном научном форуме «Нарзан-2013» (Кисловодск – 2013); Всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу» (Пятигорск – 2013); Международной научно-методической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире» (Санкт-Петербург – 2013); Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (Севастополь – 2013); Международной научной конференции «Петербургская школа поточной организации строительства (Санкт-Петербург – 2014); Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (Санкт-Петербург – 2015); Третьем национальном научном форуме «Нарзан-2015» (Кисловодск – 2015); Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (Таганрог – 2015); Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах (Санкт-Петербург – 2015); Завалишинские чтения 2016 (Санкт-Петербург – 2016), Завалишинские чтения 2017 (Санкт-Петербург – 2017), VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (Ростов-на-Дону - 2017), «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017 (Санкт-

Петербург -2017), Завалишинские чтения 2018 (Санкт-Петербург – 2018), Завалишинские чтения 2019 (Санкт-Петербург – 2019).

Материалы диссертационного исследования опубликованы в семидесяти семи научных работах, в том числе в двадцати двух изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых изданий, утвержденных ВАК, пяти учебных пособиях и одной монографии.

По теме диссертации получено 2 Патента на полезную модель, 8 Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и Свидетельство о государственной регистрации баз данных.

Основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично. Часть публикаций выполнена на паритетной основе с соавторами.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 243 наименований, и приложения. Работа изложена на 315 листах машинописного текста, содержит 154 рисунков и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показаны ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе приведен обзор некоторого числа аварий на АЭС, связанных с различными механизмами деградации металла основного оборудования, а также рассмотрено состояние контроля реакторной установки на примере РМБК-1000, установленный на ЛАЭС и обоснован выбор метода исследования диагностики реакторной установки. Подробно рассмотрено техническое устройство и произведен анализ активной зоны электростанции как объекта, характеризующегося наличием распределенных параметров.

Проведенный системный анализ процессов, технологии и конструкции реактора, позволяет выбрать типы и классы матмоделей, формы их представления, и определить программные средства, которые будут использоваться при моделировании системы контроля.

В результате применения системного подхода к анализу рассматриваемого объекта контроля и управления, а также применяя метод декомпозиции, построены иерархические структуры моделей активной зоны, позволяющие разработать адекватную математическую модель рассматриваемого объекта, которую будем разрабатывать с применением дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа.

В процессе анализа найдено «узкое» место в контуре контроля и управления: регулирование количества теплоносителя, проходящей через технологические каналы активной зоны производится с помощью ЗРК и выполняется вручную, что не позволяет осуществлять точного регулирования технологических параметров, затягивает реализацию управляющего воздействия во времени, и подвергает оперативный персонал станции излишнему воздействию радиации.

По результатам анализа можно сделать вывод, что необходимо синтезировать распределенный регулятор прямого действия для системы контроля рассматриваемого объекта, позволяющий автоматически изменять размер живого сечения ЗРК с учетом нелинейности протекающих в реакторе процессов. Для этого требуется выбрать распределенный закон управления и разработать методику определения настроек выбранного регулятора, обеспечивающего контроль заданной температуры теплоносителя в технологическом канале и, соответственно, заданную высоту экономайзерной зоны.

Установка распределенного регулятора позволит:

- увеличит скорость реакции системы на отклонения: снижения или превышения расхода воды через активную зону реактора;
- повысить точность регулирования;
- позволит повысить качество продукции (пароводяной смеси)
- ликвидирует необходимость работы оперативного персонала в зоне с повышенной радиацией;
- обеспечит увеличение безопасности техногенного объекта и срока его службы

Во второй главе подробно рассмотрены физические процессы, которые протекают в реакторной установке, разработана методика построения специального математического и алгоритмического обеспечения, необходимого для моделирования технологических процессов в активной зоне реактора, и с их учетом разработана математическая модель температурных полей в активной зоне реакторной установки. Математическая модель представляет собой нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных параболического типа, а также уравнения для теплоносителя, полученные на базе уравнений движения расхода рабочей среды, энергии и баланса массы, отражающих физические явления теплообмена и массопереноса.

На рис. 2.1 представлена одна ячейка технологического канала (ТК) в проекции на оси прямоугольной системы координат.

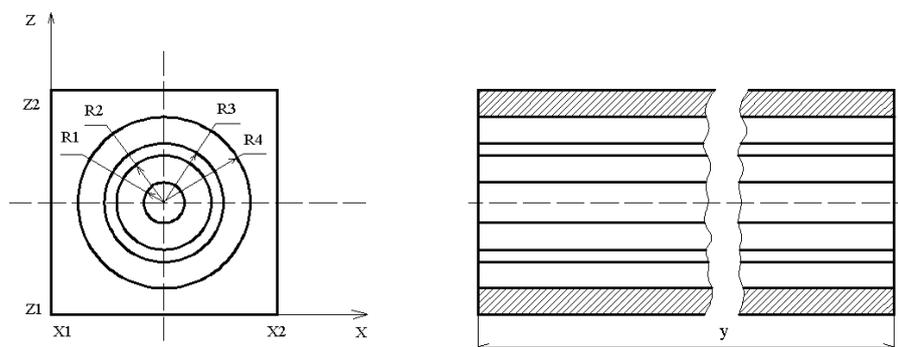


Рисунок 2.1 - Схема ТК в проекции на оси системы координат.

Математическая модель тепловых полей для одной из ячеек:

Дифференциальное уравнение, записанное для блока из графита:

$$\frac{\partial T_{p-3,f+1}(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma} V_{\Gamma}}.$$

$$X1 < x < x2, \quad Y1 < y < Y2, \quad Z3 < z < Z4 \quad (2.1)$$

где a_{Γ} – коэффициент температуропроводности графита;

x, y, z – геометрические координаты;

W_{Γ} – выделяемая в графите мощность, при торможении нейтронов;

V_{Γ} – объём, занимаемый графитовым блоком;

λ_{Γ} – коэффициент теплопроводности графита.

Дифференциальное уравнение, записанное для трубы из циркония.

$$\frac{\partial T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} =$$

$$= a_{\text{Ц}} \left[\frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right]$$

$$Y1 < y < Y2, \quad R2 < R < R3 \quad (2.2)$$

где $a_{\text{Ц}}$ – коэффициент температуропроводности циркония.

Дифференциальное уравнение, записанное для жидкости в ТК.

Для однофазного течения в трубках технологического канала (зона подогрева).

$$\frac{\partial M}{\partial y} = - \frac{\partial \rho}{\partial t};$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = q'_d; \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial y} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial p}{\partial y} + f \frac{M^2}{\rho} = 0.$$

Для двухфазного течения в трубках технологического канала (зона испарения).

$$\frac{\partial M}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial t};$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = q'_d - \frac{\partial}{\partial z} \left[M \left(\frac{w_2}{w} - 1 \right) (h - h') \right]; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial p}{\partial z} + f \frac{M^2}{\rho} = 0;$$

$$\frac{w_2}{w} = 1/[c + (1 - c)/S].$$

Функции входа U заданы положением ЗРК.

Дифференциальное уравнение, записанное для блока из графита в цилиндрической системе координат.

$$\frac{\partial T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial t} = a_{\Gamma} \left[\frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{p-3,f+1}(y, \varphi, R, t)}{\partial y^2} \right] + \frac{a_{\Gamma} W_U}{\lambda_U V_{\Gamma}};$$

$$Y1 < y < Y2, \quad \Phi1 < \varphi < \Phi2, \quad R3 < R < R4 \quad (2.5)$$

Условия граничные внутри ячейки (p-3, f+1):

Условия граничные для трубы из циркония и графита зададим соотношениями:

$$T_{Ц}(y, \varphi, R3, t) = T_{\Gamma}(y, \varphi, R3, t) \quad (2.6)$$

$$\lambda_{Ц} \frac{\partial T_{Ц}(y, \varphi, R3, t)}{\partial R} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{\Gamma}(y, \varphi, R3, t)}{\partial R} \quad (2.7)$$

Условия граничные для теплоносителя и трубы из циркония зададим соотношениями:

$$T_{Ц}(y, \varphi, R2, t) = T_{Т}(y, \varphi, R2, t) \quad (2.8)$$

$$\lambda_{Ц} \frac{\partial T_{Ц}(y, \varphi, R2, t)}{\partial R} = \lambda_{Т} \frac{\partial T_{Т}(y, \varphi, R2, t)}{\partial R} \quad (2.9)$$

Условия граничные между ячейками (p-3, f+1) и (p-2, f+1).

$$T_{p-3,f+1}(X2, y, z, t) = T_{p-2,f+1}(X2, y, z, t); \quad (2.10)$$

$$\lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p-3,f+1}(X2, y, z, t)}{\partial X} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p-2,f+1}(X2, y, z, t)}{\partial X} \quad (2.11)$$

где: $T_{p-3,f+1}$ – тепловое поле в графите в ячейке (p-3, f+1);

$T_{p-2,f+1}$ – тепловое поле в графите в ячейке (p-2, f+1);

λ_{Γ} - коэффициент теплопроводности графита.

Условия граничные между ячейками (p-3, f+1) и (p-3, f).

$$T_{p-3,f+1}(x, y, Z3, t) = T_{p-3,f}(x, y, Z3, t) \quad (2.12)$$

$$\lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p-3,f+1}(x, y, Z3, t)}{\partial Z} = \lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p-3,f}(x, y, Z3, t)}{\partial Z} \quad (2.13)$$

где: $T_{p-3,f+1}$ – тепловое поле в графите в ячейке (p-3, f+1);

$T_{p-3,f}$ – тепловое поле в графите в ячейке (p-3, f);

λ_{Γ} - коэффициент теплопроводности графита.

Условия граничные с теплоизолированными поверхностями:

$$T_{p-3,f+1}(X1, y, z, t) = 0; \quad (2.14)$$

$$\lambda_{\Gamma} \frac{\partial T_{p-3,f+1}(X1, y, z, t)}{\partial X} = 0$$

$$T_{p-3,f+1}(x, y, Z4, t) = 0 \quad (2.15)$$

$$\lambda_r \frac{\partial T_{p-3,f+1}(x, y, Z4, t)}{\partial Z} = 0$$

Полученная математическая модель является достаточно сложной, и в силу этого решить полученную систему уравнений аналитически или выделить передаточную функцию не является возможным.

Для решения полученных дифференциальных уравнений был применен метод «сеток».

На базе непрерывной математической модели была разработана дискретная математическая модель. В процессе разработки дискретной математической модели был решён ряд задач. Одна из них это организация «стыковки» условий граничных. Также были установлены шаги дискретизации, которые обеспечивают устойчивости вычислительной схемы. Кроме того, решены задачи согласования декартовой и цилиндрической систем координат.

Для проверки математического обеспечения на адекватность и проведения компьютерного моделирования было разработан специальный программный комплекс.

В качестве системы программирования был язык C++, в качестве среды разработки выбран C++ Builder. Выбор языка программирования был остановлен на C++, это вызвано тем, что данный язык используется на Ленинградской АЭС.

На рисунке 2.2 представлена главная форма программного комплекса.

Моделирование тепловых полей в активной зоне реактора
 О программе Справка Сохранить Печать

11.11.2017 10:20:15

Мощности в ТК зоне расчета

1935050	1895520	1941860	1937740	1912860	1876850	1893380	1921860	1861720	1876500	1915270	1862280	1912400
1942150	1911950	1835200	1939890	1918750	1892240	1911760	1867450	1895220	1912200	1844930	1805000	1900200
1918660	1832500	1942720	1825500	1933720	1876850	1848700	1915410	1942240	1922440	1863200	1889250	1807050
1892350	1893820	1853860	1918690	1822640	1917520	1920050	1921000	1805960	1900850	1897500	1921150	1874180

Начальные условия

Количество ТК, шт: 39
 Номер датчика: 6
 Положение ЗРК, м: 0,004
 Номер ТК: 20
 Время процесса, сек: 2

Q тепл, мЗ/ч: 34
 T тепл, С: 273
 G вод, мЗ/ч: 36
 U вод, м/с: 5
 T твс, С: 850

Распределение температуры теплоносителя по высоте

0	273
1	273.239257812
2	273.477874755
3	273.715820312
4	273.953125
5	274.189758300
6	274.425750732
7	274.661102294
8	274.895812988
9	275.129882812
10	275.363311767
11	275.596130371
12	275.828308105
13	276.059875488
14	276.290893554

Состояние процесса моделирования

Расчет

Температура в датчике

Графики переходных процессов

Анализ объекта управления

Расчет параметров регулятора по желаемой передаточной функции

Расчет параметров регулятора по степени колебательности

Моделирование замкнутой системы управления

Адаптация

Рисунок 2.2 - Главная форма программы

С помощью этого комплекса были вычислены значения тепловых полей в заданных точках, совпадающих с расположением датчиков на реальном объекте. Результаты моделирования были сравнены с данными, полученными с помощью информационно-вычислительной системы «Скала-микро», осуществляющей мониторинг работы реактора.

Результаты приведенных экспериментов свидетельствуют об адекватности полученной матмодели, и что разработанное программное обеспечение разрешает с высокой точностью производить моделирование тепловых процессов, которые имеют место в активной зоне.

Разработанная методика позволяет проводить моделирование тепловых процессов в активной зоне атомных реакторов, а, следовательно, и проводить контроль и мониторинг состояния реактора, обнаруживать сбои в его работе при штатных и нештатных ситуациях.

Третья глава посвящена рассмотрению основных методов моделирования объектов с распределенными параметрами. Рассмотрены два направления решения задач моделирования систем, характеризующихся наличием распределенных параметров. Первое направление заключается в моделировании с помощью функции Грина. Второе направления заключается в моделировании с помощью сеток.

Рассмотрена методика, позволяющая производить вывод передаточных функций распределенных объектов. С помощью данной методики в главе произведен вывод передаточной функции распределенного пространственно-апериодического звена и построены его частотные характеристики.

$$W_6(G, p) = \frac{E_6 \left[\frac{n_6 - 1}{n_6} + \frac{1}{n_6} \cdot G \right]}{T_6 \left[\frac{n_6 - 1}{n_6} + \frac{1}{n_6} \cdot G \right] \cdot p + 1}, \quad (3.1)$$

где E_6 – коэффициент передачи; n_6 – коэффициент веса ($n_6 \geq 1$); T_6 – постоянная времени; G – обобщенная координата.

С помощью программы Mathcad было произведено построение амплитудно-фазовой частотной характеристики пространственно-апериодического звена.

Пространственный годограф для пространственно-апериодического звена представлен на рис.3.1.

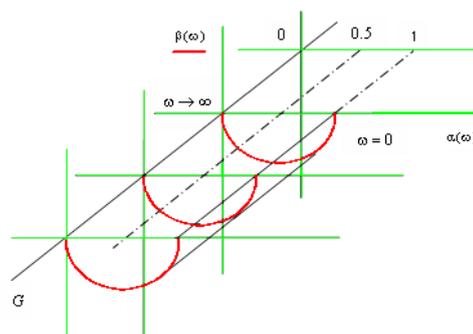


Рисунок 3.1 - Пространственный годограф пространственно-апериодического звена

Рассмотрим случай, когда коэффициент веса имеет значение:
 $n_6 = 1, n_6 = 10, n_6 = 100, n_6 = 1000$ и произведём построение частотных характеристик.

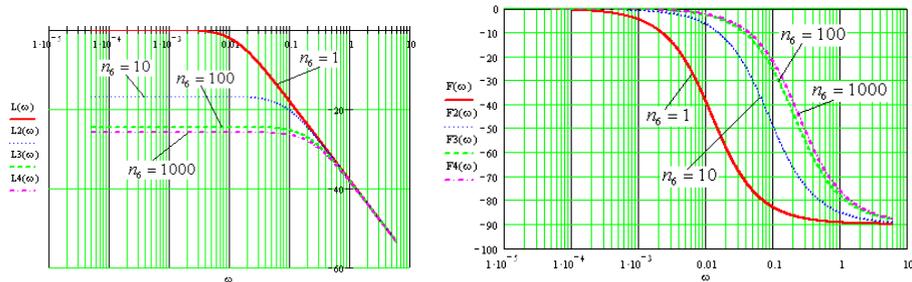


Рисунок 3.2 - Логарифмические амплитудно-частотные характеристики и фазо-частотные при $n_6 = 1, n_6 = 10, n_6 = 100, n_6 = 1000$

Кроме того, была разработана методика определения параметров распределенного пространственно-апериодического звена и с помощью многочисленных численных экспериментов были получены номограммы, позволяющие производить расчет параметров звена.

В четвертой главе рассмотрены математические модели распределённых регуляторов реализующих различные распределенные алгоритм управления и разработаны методики определения их настроек. С этой целью были разработаны и представлены методики определения области устойчивости распределенных систем с различными алгоритмами управления, с применением обычных и расширенных частотных характеристик. В частности, для объектов с протекающими в них тепловыми процессами, моделируемых с помощью передаточных функций вида:

$$W_0(G, p) = \frac{\exp(\beta(G) \cdot z^*) + \exp(-\beta(G) \cdot z^*)}{\exp(\beta(G) \cdot L_z) + \exp(-\beta(G) \cdot L_z)}, \quad G_H \leq G \leq \infty, \quad (4.1)$$

где $\beta(G) = \left(G + \frac{p}{a}\right)^{1/2}$, $G_H = \tilde{G}_H = \psi_\eta^2 + \tilde{\varphi}_\eta^2$, была разработана методика построения расширенных частотных характеристик.

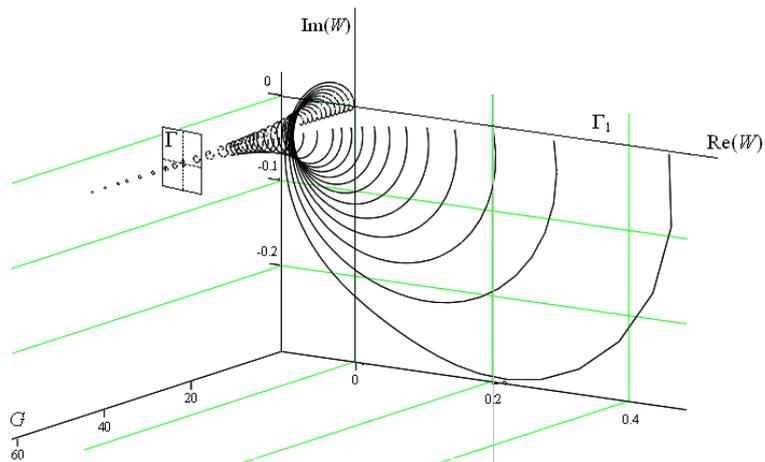


Рисунок 4.1 - Пространственный годограф

Для нахождения частотной характеристики объекта, по заданной (η, γ, ξ) пространственной гармонической составляющей входного сигнала, необходимо рассеять пространственный годограф плоскостью Γ , параллельной плоскости Γ_1 и проходящей через точку с координатами:

$$\operatorname{Re}(W)=0, \operatorname{Im}(W)=0, G = \tilde{G}(\eta, \gamma, \xi).$$

След пересечения плоскости Γ и расширенного пространственного годографа будет представлять искомую расширенную частотную характеристику. Найденные расширенные частотные характеристики могут применяться для проведения анализа объектов на предмет оценки запаса устойчивости и легли в основу разработанной методики анализа систем с распределёнными параметрами на запас устойчивости по показателю колебательности.

Разработаны корневые методы настройки распределенных систем с типовыми распределенными регуляторами, реализующими различные алгоритмы управления, позволяющие обеспечить заданный запас устойчивости. Разработанные методики позволяют решать вопрос обеспечения устойчивости и создания запаса устойчивости для систем с распределенными параметрами заданной структуры и распределенным регулятором

Разработаны аналитическая методика синтеза оптимальных распределенных систем управления и номографическая методика определения параметров распределенных регуляторов.

Одной из основных проблем проектирования систем контроля и управления, характеризующихся распределенными параметрами является проблема определения и реализации динамических характеристик, наилучшим образом удовлетворяющих поставленным требованиям и в то же время не нарушающих заданным ограничениям.

В настоящее время известны такие способы в решении проблемы расчета регуляторов для распределенных систем как метод АКОР; частотный метод анализа синтеза; параметрический расчет регуляторов. Перечисленные методы характеризуются большим объемом вычислений. В связи с этим актуальной является задача выбора методов анализа и синтеза алгоритмов регулирования по заданным показателям качества, которые бы позволили связать аналитическими зависимостями параметры динамических характеристик распределенного объекта и распределенного регулятора с прямыми показателями качества желаемых переходных процессов и не требовал большого объема вычислений.

В связи с этим была разработана методика, позволяющая производить вывод «желаемой» передаточной функции распределенного регулятора для объекта с передаточной функции в виде распределенного пространственно-апериодического звена, имеющей желаемые параметры.

Тепловые процессы, протекающие в объектах с распределенными параметрами (ОРП) могут быть описаны с помощью следующей передаточной функции:

$$W_o(G, p) = \frac{E_\eta}{T_\eta \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_\eta p} \quad (4.2)$$

где: $E_\eta = E_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]$ – коэффициент усиления объекта;
 $T_\eta = T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]$ – постоянная времени; G – обобщенная координата; τ_η – время запаздывания, n – весовой коэффициент.

Далее задаёмся передаточной функцией ОРП, являющейся желаемой для системы по задающему воздействию в виде:

$$W_{\text{жс}}(G, p) = \frac{1}{T_{\text{жс}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \cdot G \right] \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{\text{жс}} p} \quad (4.3)$$

Используя разработанную методику, произведем вывод передаточной функции распределенного регулятора для объектов с передаточной функцией (4.2), которую запишем в следующем виде:

$$W_p(G, p) = \frac{T_p p + 1}{W_o(G, p)(T_z + \tau_{\text{жс}}) p} \quad (4.4)$$

где: $T_p = \frac{0.5 \cdot \tau_{\text{жс}}}{\frac{T_z}{\tau_{\text{жс}}} + 1}$ – постоянная времени регулятора;

$T_z = T_{\text{жс}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]$ – заданное значение постоянной времени объекта;

Подставив выражение (4.2) в передаточную функцию (4.4) с учетом выражения (4.3) получим передаточную функцию регулятора распределенного:

$$W_p(G, p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]} \cdot \frac{1}{p} + \frac{0.5 \tau_{\text{жс}}^2}{T_{\text{жс}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\text{жс}}} \cdot p \right) \quad (4.5)$$

где $K_p = \frac{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]}{E_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] \left(T_{\text{жс}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\text{жс}} \right)}$.

Результаты моделирования системы контроля с данным регулятором показали высокое качество управления объектом в полном соответствии с поставленными требованиями к системе управления. Основываясь на полученные результаты, применим разработанную методику для создания системы контроля тепловыми полями активной зоны реактора.

Пятая глава посвящена системам контроля с распределенными параметрами, у которых динамические и статические свойства систем изменяются во времени и в пространстве. Одной из распространенных задач является стабилизация динамических свойств технологических объектов, основными режимами работы которых являются переходные режимы. Под влиянием различных случайных факторов и вследствие изменения параметров системы возможно нарушение этих режимов. Системы данного класса требуют разработки новых методов адаптивного управления. В главе рассмотрены основные принципы адаптации.

Разработаны следующие методики синтеза адаптивных систем контроля и управления:

1. методика синтеза адаптивной системы контроля и управления с распределенным ПИ-регулятором;
2. методика синтеза адаптивной системы контроля и управления с распределенным ПИД-регулятором;
3. методика синтеза адаптивной системы контроля и управления с «желаемой» передаточной функцией.

Рассмотрим процедуру адаптации при наличии эталонной модели.

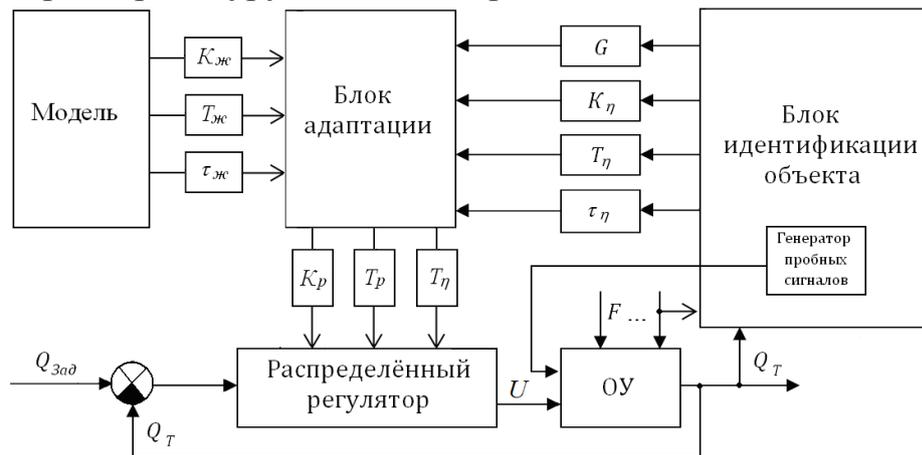


Рисунок 5.1 - Блок-схема адаптивной системы с моделью

Передаточная функция разрабатываемого распределенного регулятора имеет вид:

$$W_p(G, p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]} \cdot \frac{1}{p} + \frac{0.5\tau_{ж}^2}{T_{жс} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{жс}} \cdot p \right) \quad (5.1)$$

где

$$K_p = \frac{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]}{E_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] \left(T_{жс} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{жс} \right)};$$

$$T_{\eta} = T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]; \quad T_p = \frac{0.5\tau_{ж}^2}{\left(T_{ж} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{ж} \right)}.$$

С помощью модели задаём желаемые значения коэффициента передачи, постоянной времени и время запаздывания объекта управления.

$$W_{жс}(G, p) = \frac{1}{T_{жс} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} \cdot G \right] \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{жс} p} \quad (5.2)$$

Применяя блок идентификации параметров объекта, в результате моделирования, находим параметры K_{η} , T_{η} , τ_{η} . Для этого генератор пробных сигналов создает и отправляет на вход сигнал вида:

$$U(x, y, p) = C_{\eta, \gamma}(s) \sin(\Psi_{\eta} \cdot x) \cdot \sin(\bar{\Psi}_{\gamma} \cdot y) \quad (5.3)$$

где $C_{\eta, \gamma} = e^{j\omega\tau}$; $\Psi_{\eta} = \frac{\pi \cdot \eta}{x_l}$; $\bar{\Psi}_{\gamma} = \frac{\pi \cdot \gamma}{r_l}$.

В результате находим значения параметров K_{η} , T_{η} , τ_{η} , которые подаются на вход блока адаптации.

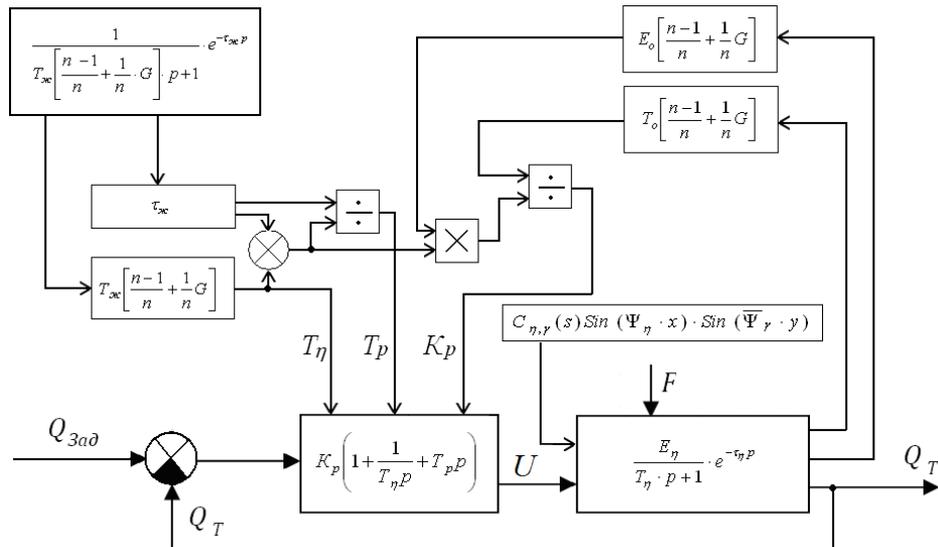


Рисунок 5.2 - Блок-схема адаптивной системы с моделью

Для проверки полученных данных и проведения моделирования адаптивной системы управления было написано специальное программное обеспечение. Данное ПО позволило сделать вывод, что применение адаптивной распределенной системы управления дает возможность:

1. автоматически находить настройки распределенного регулятора;
2. производить процесс самонастройки при низком уровне пробного сигнала, не приводящего к нарушению нормального функционирования ОУ;
3. осуществлять контроль процесса самонастройки и изменения настроек со стороны оператора;

4. осуществлять контроль процесса настройки в автоматическом режиме с целью исключения неустойчивой работы системы;

На основании полученных результатов можно заключить, что применение адаптивной системы с распределенным регулятором позволяет повысить быстродействие и надежность системы контроля, а также добиться заданных показателей качества управления.

Шестая глава посвящена разработке новых методов анализа нелинейных систем, характеризующихся наличием распределенных параметров. Одним из этих методов является метод фазовой плоскости.

В главе произведена модификация метода Гольдфарба для проведения анализа нелинейных систем, имеющих распределенные параметры. Сформулирован порядок его применения применительно к распределенным системам с двухпозиционным и с трехпозиционным релейным регуляторами.

Рассмотрим пример с трехпозиционным релейным регулятором. Структурная схема системы показана на рисунке 6.1.

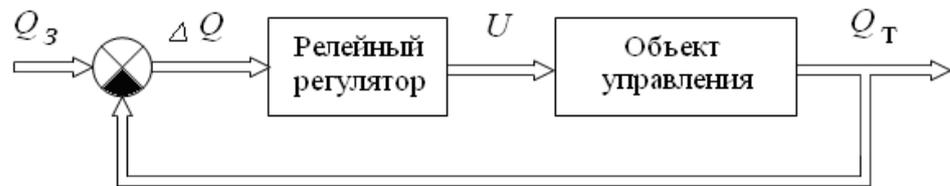


Рисунок 6.1 - Структурная схема релейной системы управления

Ниже представлена математическая модель рассматриваемой системы управления.

$$\frac{\partial Q(x, r, \varphi, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 Q(x, r, \varphi, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q(x, r, \varphi, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 Q(x, r, \varphi, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 Q(x, r, \varphi, t)}{\partial x^2} \right), \quad (6.1)$$

$$0 < x < L_x, \quad 0 < r < R, \quad 0 < \varphi < \Phi.$$

Граничные и начальные условия представлены соотношениями:

$$Q(L_x, r, \varphi, t) = 0, \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial Q(x, R, \varphi, t)}{\partial r} = 0, \quad (6.3)$$

$$\lambda \frac{\partial Q(0, r, \varphi, t)}{\partial x} = U(r, \varphi, t), \quad (6.4)$$

$$Q(x, r, \varphi, 0) = 0. \quad (6.5)$$

В качестве регулятора используем двухпозиционное реле, которое имеет статическую характеристику

$$F(x) = \begin{cases} b & \text{при } x > a; \\ 0 & \text{при } -a < x < a; \\ -b & \text{при } x < -a. \end{cases} \quad (6.6)$$

Общая передаточная функция системы в разомкнутом состоянии будет иметь вид:

$$W_{раз}(G, p, A) = W_{нэ}(G, A) \cdot W_{лч}(G, p). \quad (6.7)$$

Условие существования автоколебаний в замкнутой системе можно записать в виде:

$$W_{нэ}(G, A) \cdot W_{лч}(G, p) = -1. \quad (6.8)$$

В соответствие с методом Гольдфарба представим его в виде:

$$W_{лч}(G, p) = -\frac{1}{W_{нэ}(G, A)}. \quad (6.9)$$

Автоколебания в системе могут иметь место, если соблюдается два условия гармонического баланса:

1. $|W_{лч}(G, p)| = \left| \frac{1}{W_{нэ}(G, A)} \right|$
2. $\varphi_{нэ}(G, A) + \varphi_{лч}(G, \omega) = -\pi$

Первое условие. Отдельно построенная левая часть уравнения при изменении частоты и отдельно построенная правая часть уравнения при изменении амплитуды имеют общую точку пересечения.

Второе условие. Точки пересечения соответствуют суммарному фазовому сдвигу на угол $-\pi$.

Рассмотрим случай для $\eta=1, 3, 5, 7, 9, 11$ и в результате моделирования найдём значения параметров K_η , T_η , τ_η далее проведем расчет АФЧХ и $Z(G, A)$.

Используя полученные результаты произведем построение АФЧХ линейной части системы и $Z(G, A)$.

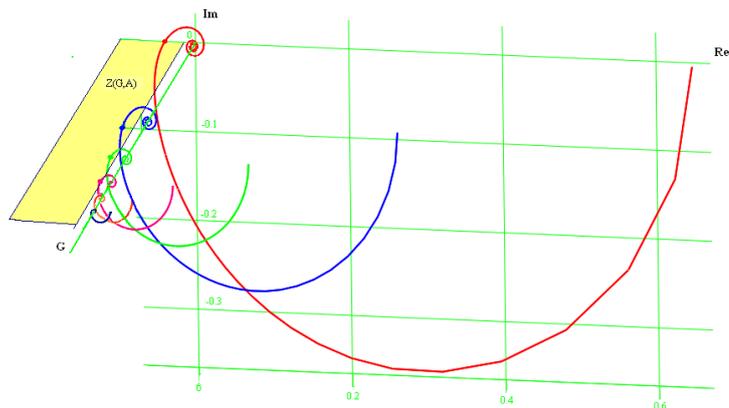


Рисунок 6.2 - АФЧХ линейной части системы и $Z(G, A)$ при $\eta = 1, 3, 5, 7, 9, 11$

Годографы $W_{лч}(G, p)$ для $\eta = 1, 3, 5, 7$ и $Z(G, A)$ пересекаются в точках, соединив которые получаем линию $\Lambda(G, A, p)$, для $\eta = 9, 11$ общих точек пересечения не имеется.

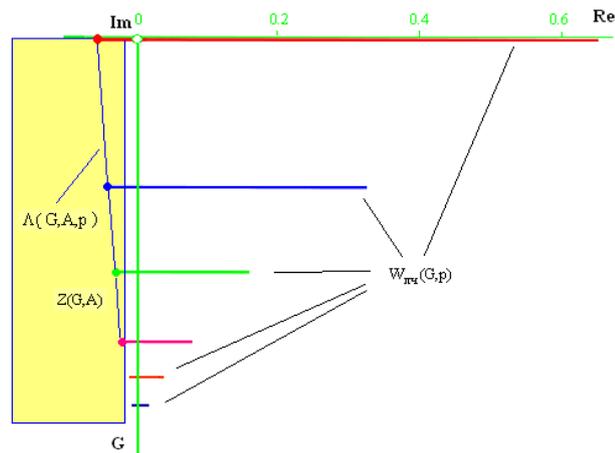


Рисунок 6.3 - АФЧХ линейной части системы и $Z(G, A)$ при $\eta = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ (вид сверху)

Также в главе произведена модификация критерия устойчивости Михайлова для последующего использования для оценки устойчивости нелинейных систем управления с распределенными параметрами.

Разработанная методика позволит производить исследование нелинейных систем с распределёнными параметрами на предмет определения запаса устойчивости по показателю колебательности. В основе метода лежит построение амплитудно-фазовых частотных характеристик, а именно расширенного пространственного годографа.

В седьмой главе рассмотрен процесс разработки системы контроля и управления температурными полями активной зоны реакторной установки. Представлено описание существующей системы управления. Проведен анализ активной зоны как объекта с распределенными параметрами.

Предложена новая система контроля, в основе которой лежат методы теории СРП, представленная на рис. 7.1.

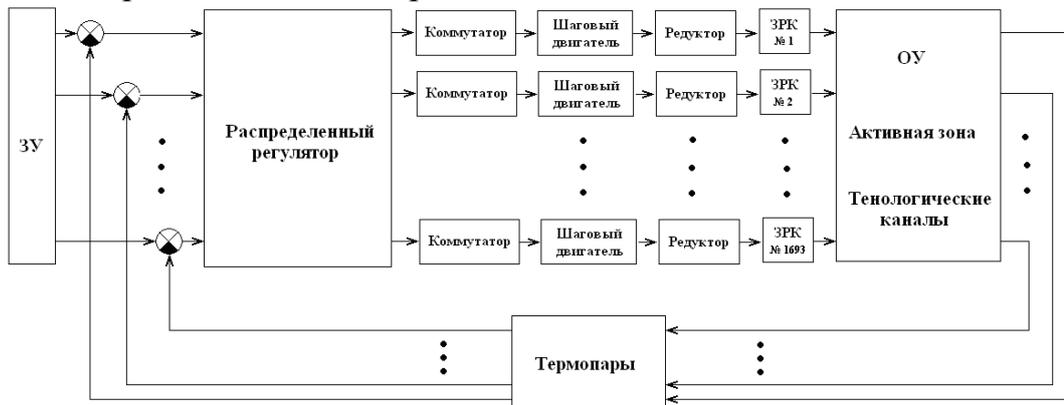


Рисунок 7.1 - Структурная схема

В качестве исполнительного механизма (ИМ) рекомендуется применять шаговый двигатель (ШД).

Математическая модель рассмотренного объекта, а именно активной зоны, описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных.

В работе были рассмотрены варианты управления объектом при использовании регуляторов реализующих различные алгоритмы управления.

В первую очередь были рассмотрены системы контроля и управления с релейным регулятором.

Проведен их сравнительный анализ, показывающий невозможность их применения на объектах данного класса.

В качестве регулятора применим реле трехпозиционное с зоной нечувствительности. С помощью специально написанного программного обеспечения произведем построение графиков управляющего воздействия, переходного процесса и фазового портрета системы для контрольной точки.

Далее проведен анализ автоколебаний в рассматриваемой нелинейной системе с помощью метода Гольдфарба.

Рассмотрим случай когда $\eta = 1, 3, 5, 7, 9, 11$, произведем расчет и построение АФЧХ и $Z(G, A)$ (рис.7.2).

По результатам расчета построим на комплексной плоскости АФЧХ линейной части САУ и $Z(G, A)$ реле. Как мы видим, график $Z(G, A)$ находится в отрицательной вещественной полуплоскости комплексной плоскости.

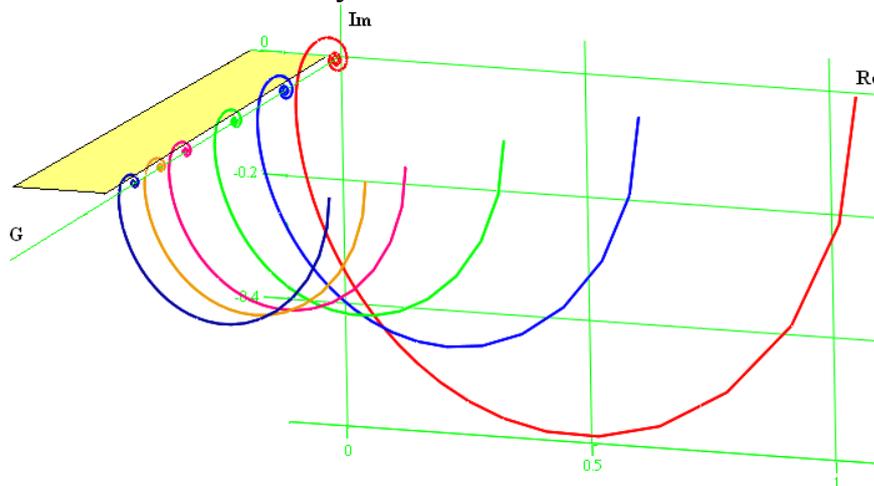


Рисунок 7.2 - АФЧХ линейной части САУ и $Z(G, A)$ при $\eta = 1, 3, 5, 7, 9, 11$

Годографы $W_{лч}(G, p)$ для $\eta = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ и $Z(G, A)$ пересекаются в точках, соединив которые получаем линию $\Lambda(G, A, p)$ (рис. 7.3).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии в системе автоколебаний при любых значениях η .

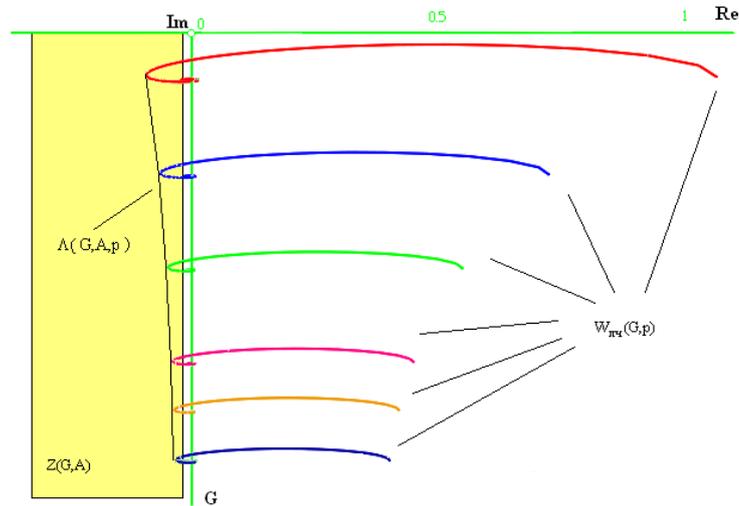


Рисунок 7.3 - АФЧХ линейной части системы и $Z(G, A)$ при $\eta = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ (вид сверху)

При использовании регулятора релейного типа не удалось добиться заданного качества регулирования и точности, столь необходимых для рассматриваемого технологического процесса. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность использования регуляторов непрерывного принципа действия.

Рассмотрим систему контроля и управления с распределенным регулятором, синтезированным с учетом желаемой передаточной функции объекта.

Запишем желаемую передаточную функцию. Её параметры обусловлены требованиями к качеству переходного процесса, требуемого нормативными документами ЛАЭС.

$$W_{\text{жс}}(G, p) = \frac{E_{\text{жс}} \left[\frac{n_{\text{жс}} - 1}{n_{\text{жс}}} + \frac{1}{n_{\text{жс}}} \cdot G \right]}{T_{\text{жс}} \left[\frac{n_{\text{жс}} - 1}{n_{\text{жс}}} + \frac{1}{n_{\text{жс}}} \cdot G \right] \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_{\text{жс}} p} \quad (7.1)$$

$$W_{\text{жс}}(G, p) = \frac{0.7407 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} + \frac{1}{56.3897} \cdot 5.9841 \right]}{0.3711 \left[\frac{56.3897 - 1}{56.3897} + \frac{1}{56.3897} \cdot 5.9841 \right] \cdot p + 1} \cdot e^{-0.1002 p}$$

Запишем передаточную функцию распределенного регулятора.

$$W_p(G, p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]} \cdot \frac{1}{p} + \frac{0.5 \tau_{\text{жс}}^2}{T_{\text{жс}} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{\text{жс}}} \cdot p \right) \quad (7.2)$$

$$K_p = \frac{T_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right]}{E_o \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] \left(T_{жс} \left[\frac{n-1}{n} + \frac{1}{n} G \right] + \tau_{жс} \right)} \quad (7.3)$$

Для расчетов параметров используем разработанное программное обеспечение. Диалоговое окно представлено на рис. 7.4.

Рисунок 7.4 - Расчет параметров регулятора

Подставим в передаточную функцию полученные численные значения параметров.

$$W_p(G, p) = K_p \left(1 + \frac{1}{0.5227 \left[\frac{56.3897-1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right]} \cdot \frac{1}{p} + \frac{0.5 \cdot 0.1002^2}{0.3711 \left[\frac{56.3897-1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right] + 0.1002} \cdot p \right) \quad (7.4)$$

$$K_p = \frac{0.5227 \left[\frac{56.3897-1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right]}{0.7594 \left[\frac{56.3897-1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right] \left(0.3711 \left[\frac{56.3897-1}{56.3897} - \frac{1}{56.3897} \nabla^2 \right] + 0.1002 \right)} \quad (7.5)$$

Таким образом, была получена передаточная функция распределенного регулятора, который позволяет реализовать ПИД алгоритм управления.

Так же был произведен расчет настроек регулятора по требуемой степени колебательности.

Передаточная функция рассчитываемого регулятора имеет вид:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p \quad (7.6)$$

Используя методику, подробно представленную в разделе 5, произведем расчет параметров передаточной функции распределенного регулятора, задав степень колебательности равной $m = 0.221$. Результат представлен на рис. 7.5.

Расчет параметров регулятора по степени колебательности 17.10.2015 1:53:05

Входные параметры первой моды		Входные параметры последней моды	
Обобщенная координата G_1	5,984	Обобщенная координата G_3	17,952
Коэффициент передачи K_1	1,0257	Коэффициент передачи K_3	1,0392
Постоянная времени T_1	0,7125	Постоянная времени T_3	0,8232
Время задержки τ_1	0,1002	Время задержки τ_3	0,1002
Степень колебательности m	0,221		

Значения параметров регулятора

E_1	5,09475	n_1	70,38632	E_2	0,05792	n_2	1723526	E_4	5,37612	n_4	320,11007
-------	---------	-------	----------	-------	---------	-------	---------	-------	---------	-------	-----------

Рисунок 7.5 - Расчет параметров регулятора

Запишем передаточную функцию распределенного высокоточного регулятора:

$$\begin{aligned}
 W(x, y, p) &= 5.09475 \cdot \left[\frac{70.38632 - 1}{70.38632} - \frac{1}{70.38632} \nabla^2 \right] + \\
 &+ 5.37612 \cdot \left[\frac{320.11007 - 1}{320.11007} - \frac{1}{320.11007} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + 0.05792 [1 - 0 \cdot \nabla^2] \cdot p \\
 W(x, y, p) &= 5.09475 \cdot [0.995939 - 0.00406 \nabla^2] + \\
 &+ 5.37612 \cdot [0.999936 - 0.000063 \nabla^2] \cdot \frac{1}{p} + 0.05792 \cdot [1 - 0 \cdot \nabla^2] \cdot p \quad (7.7)
 \end{aligned}$$

Рассмотрим процесс моделирования замкнутой системы на примере системы с регулятором, рассчитанным по степени колебательности.

Каждому углу поворота ЗРК ставится в соответствие некоторое значение температуры в заданной точке.

Была разработана структурная схема системы контроля (рис. 7.1).

Запишем алгоритм управления:

$$U(x, z, p) = D_1(x, z, p) + \frac{D_4(x, z, p)}{p} + D_2(x, z, p) \cdot p, \quad (7.8)$$

где $D_i(x, z, p) = E_i \left[\frac{n_i - 1}{n_i} \cdot F(x, z, p) - \frac{1}{n_i} \cdot \nabla^2 F(x, z, p) \right]; \quad (i = 1, 2, 4).$

Дискретный аналог алгоритма управления (7.8) имеет вид:

$$U(x_v, z_\xi, p) = D_1(x_v, z_\xi, p) + \frac{D_4(x_v, z_\xi, p)}{p} + D_2(x_v, z_\xi, p) \cdot p, \quad (7.9)$$

где $D_i(x_v, z_\xi, p) = E_i \left[\frac{n_i - 1}{n_i} \cdot F(x_v, z_\xi, p) - \frac{1}{n_i} \cdot \nabla^2 F(x_v, z_\xi, p) \right], \quad (i = 1, 2, 4),$

$$\nabla^2 F(x_v, z_\xi, p) = \frac{F(x_{v-1}, z_\xi, p) - 2 \cdot F(x_v, z_\xi, p) + F(x_{v+1}, z_\xi, p)}{\Delta x^2} +$$

$$\frac{F(x_v, z_{\xi-1}, p) - 2 \cdot F(x_v, z_\xi, p) + F(x_v, z_{\xi+1}, p)}{\Delta z^2}$$

$$1 < v < N_x, \quad 1 < \xi < N_y,$$

Применяя передаточную функцию рассчитываемого регулятора

$$W(x, y, p) = 5.08766 \cdot \left[\frac{70.38744 - 1}{70.38744} - \frac{1}{70.38744} \nabla^2 \right] +$$

$$+ 5.36675 \cdot \left[\frac{320.27698 - 1}{320.27698} - \frac{1}{320.27698} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + 0.05802 [1 - 0 \cdot \nabla^2] \cdot p$$

составим алгоритм управления и запишем его в области времени:

$$U(x_v, z_\xi, \tau) = 5.08766 \cdot \left[\frac{69.38744}{70.38744} \cdot F(x_v, z_\xi, \tau) - \frac{1}{70.38744} \nabla^2 F(x_v, z_\xi, \tau) \right] +$$

$$+ \sum_{\tau} 5.36675 \cdot \left[\frac{319.27698}{320.27698} - \frac{1}{320.27698} \nabla^2 F(x_v, z_\xi, \tau) \right] \cdot \Delta \tau + \quad (7.10)$$

$$+ 0.05802 \cdot \frac{F(x_v, z_\xi, \tau) - F(x_v, z_\xi, \tau - \Delta \tau)}{\Delta \tau},$$

$$1 < v < N_x, \quad 1 < \xi < N_y$$

где

$$\nabla^2 F(x_v, z_\xi, \tau) = \frac{F(x_{v-1}, z_\xi, \tau) - 2 \cdot F(x_v, z_\xi, \tau) + F(x_{v+1}, z_\xi, \tau)}{\Delta x^2} +$$

$$\frac{F(x_v, z_{\xi-1}, \tau) - 2 \cdot F(x_v, z_\xi, \tau) + F(x_v, z_{\xi+1}, \tau)}{\Delta z^2},$$

$$F(x_v, z_\xi, \tau) = T_3(x_v, z_\xi, \tau) - T_T(x_v, z_\xi, Y, \tau),$$

$T_3(x_v, z_\xi, \tau)$ – заданное значение теплового поля,

$T_T(x_v, z_\xi, Y, \tau)$ – текущее значение теплового поля.

Используя модели регулятора и объекта, проведем моделирование замкнутой системы управления.

Для расчета численного значения температуры в заданной точке составлено дополнение к написанной ранее программе.

Произведем моделирование замкнутой системы управления при $m=0.119$, $m=0.221$, $m=0.366$, а также при использовании распределенного регулятора, синтезированного по желаемой передаточной функции объекта управления (Рис. 7.6, 7.7).

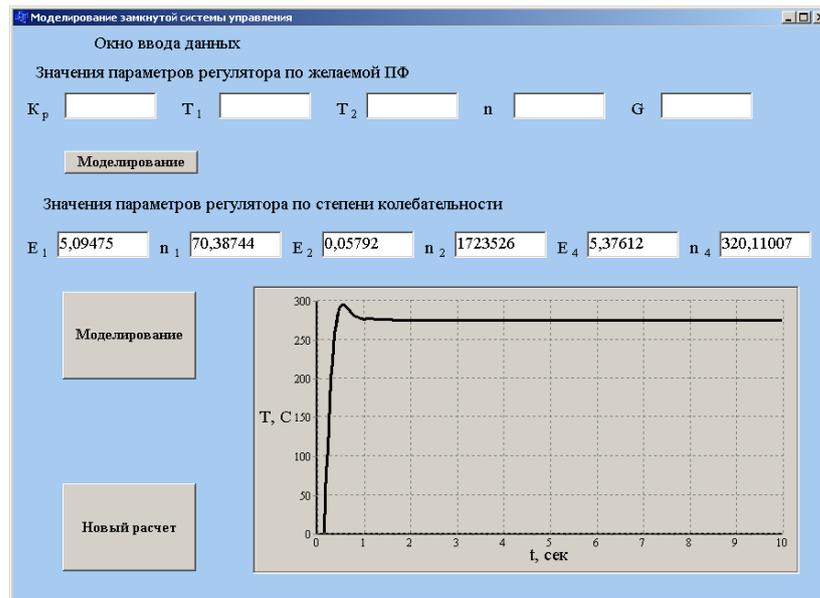


Рисунок 7.6 - Результаты моделирования при $m = 0.221$

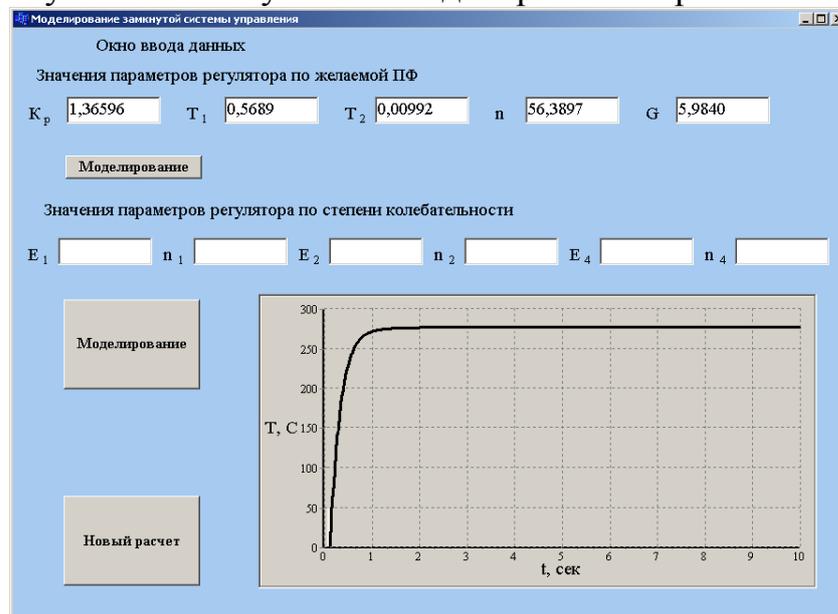


Рисунок 7.7 - Результаты моделирования при регуляторе, синтезированном по желаемой передаточной функции объекта

Как отмечалось ранее во втором разделе различные режимы течения, характеризуются различными значениями коэффициентов теплоотдачи. Особенно большие различия наблюдаются на границах между режимами IV – V

и V – VI, вследствие чего в стенке трубы возникают большие температурные перепады вблизи этих границ (и, следовательно, температурные напряжения). Границы режимов циклически дрейфуют по длине трубы, что, в конечном счете, приводит к возникновению циклических температурных напряжений, вызывающих усталость металла труб.

Данные процессы растянуты во времени, но имеющееся в нашем распоряжении программное обеспечение позволяет промоделировать эти процессы, значительно уменьшив период колебаний. На рис. 7.8 показан график переходного процесса возмущающегося воздействия, действующего в циркониевых трубках.

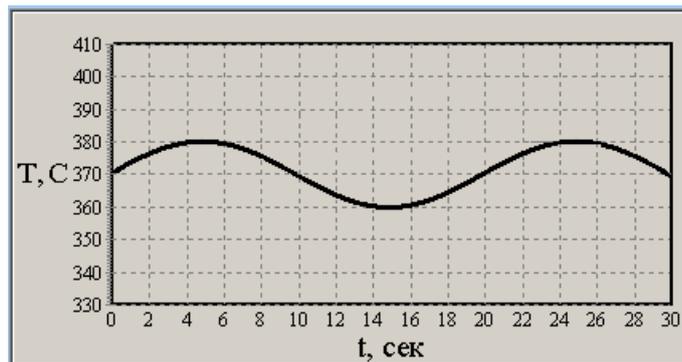


Рисунок 7.8 - График переходного процесса возмущающегося воздействия

Внеся в программный код соответствующие изменения, произведем моделирование. На рис. 7.9 и 7.10 представлены результаты.

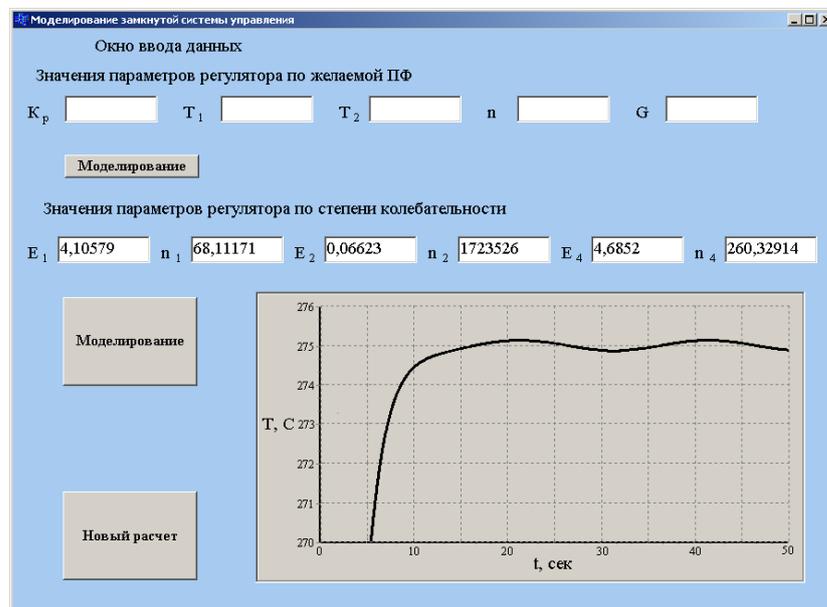


Рисунок 7.9 - Моделирование с распределенным регулятором при $m = 0.366$

По результатам моделирования можно сделать вывод, что система контроля и управления с распределенным регулятором, синтезированным с учетом желаемой передаточной функции объекта выполняет управление

температурой с заданной точностью и в полном соответствии с заданными требованиями.

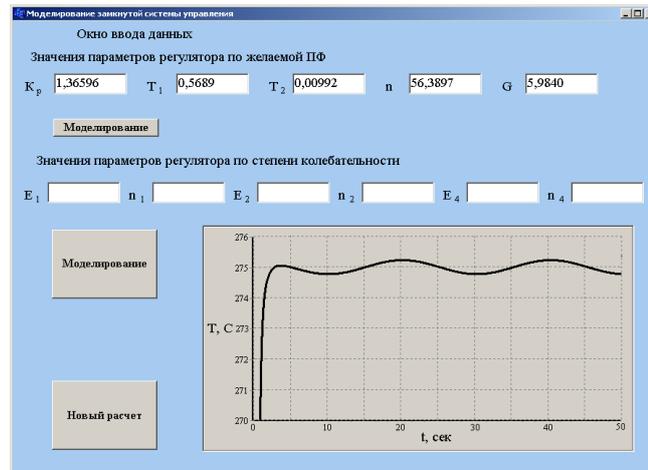


Рисунок 7.10 - Моделирование с распределенным регулятором, синтезированным по желаемой передаточной функции объекта

По причине неравномерности выгорания топлива параметры данного объекта будут изменяться во времени, что в общем случае требует применения принципа адаптации.

В связи с этим предлагается следующая структурная схема системы управления ЗРК с применением распределенного регулятора, представленная на рис. 7.11.

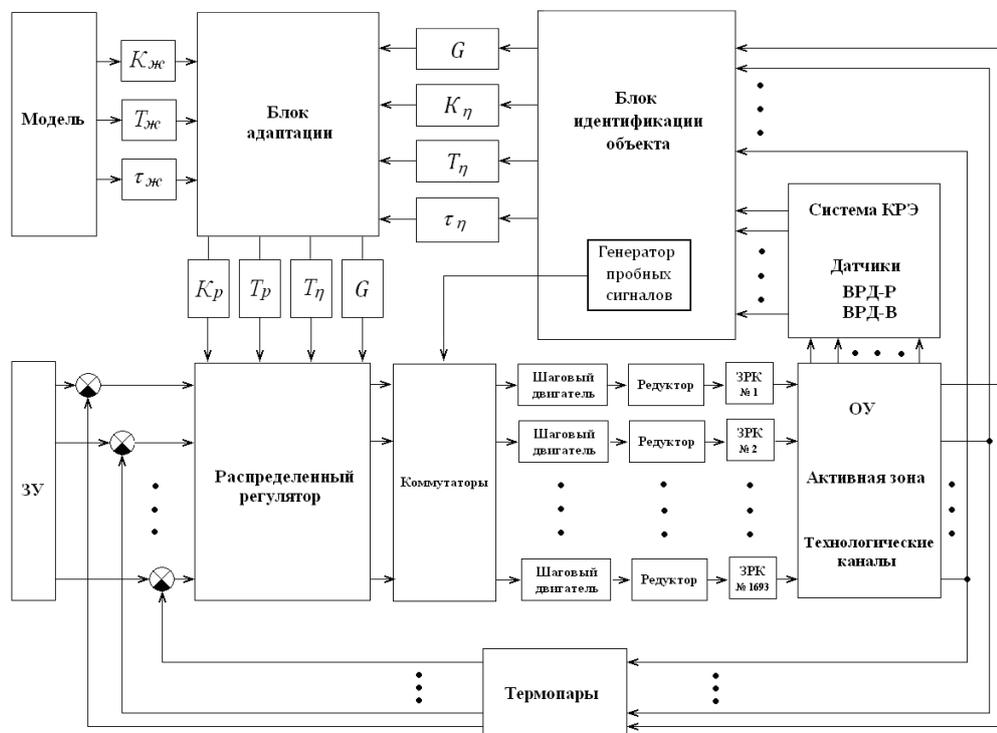


Рисунок 7.11 - Структурная схема адаптивной системы управления

Алгоритм работы распределенного ПИД-регулятора с автоматической адаптацией состоит из следующих этапов:

- 1) идентификация параметров распределенного объекта регулирования;
- 2) вычисление коэффициентов распределенного ПИД-регулятора;
- 3) ввод коэффициентов в распределенный ПИД-регулятор.

По результатам проведенного анализа в качестве регулятора предлагается использовать распределенный регулятор, передаточная функция которого (7.4), (7.5) разработана с учетом желаемой передаточной функции исследуемого объекта управления (7.1).

Применение данного регулятора для управления расходом воды проходящей через активную зону канального реактора и применение принципов адаптации может качественно улучшить анализ и управление объектом.

Для исследуемой системы отклонение параметров распределенного регулятора от заданных может быть определено только в режиме, когда под действием возмущений температура пароводяной смеси отклоняется от номинального значения больше заданной величины и регулятор обрабатывает возмущающий сигнал. По полученному переходному процессу и характеру возмущения системой может приниматься решение о коррекции параметров настройки регулятора в случае несоответствия заданным критериям.

Для моделирования работы адаптивной системы управления температурой теплоносителя в активной зоне реактора было разработано специальное программное обеспечение.

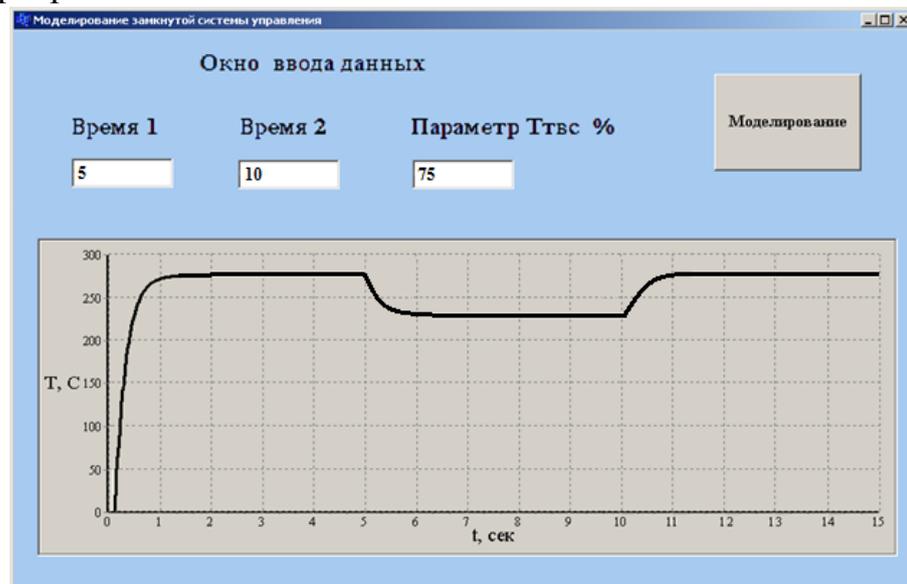


Рисунок 7.12 - Окно моделирования адаптивной системы управления

В окне моделирования зададим исходные данные. Время изменения энерговыделения зададим в размере 5 секунд, время включения регулятора с адаптированными настройками, при этом будем считать, что энерговыделение упало на 25% от номинального значения.

На рис. 7.12 показаны результаты моделирования, которые свидетельствуют о надёжной работе разработанной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование распределенных систем контроля и управления. В качестве объекта управления была рассмотрена активная зона реактора РМБК-1000. На данном примере рассматривается методика составления математических моделей и решается задача разработки системы распределенного контроля и управления с оценкой устойчивости системы и качества управления.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

- рассмотрены методы расчета систем управления с распределенными параметрами и выделен класс систем управления с подвижным воздействием (жидким теплоносителем);
- рассмотрены общие подходы к построению матмоделей распределенных систем управления с подвижным источником воздействия, допускающих адаптацию на различные распределенные объекты управления, управляющее воздействие на которые реализуется с использованием подвижных (жидких) теплоносителей;
- разработана методика составления математических моделей объектов с распределенными параметрами, имеющих различную физическую природу, сложную геометрическую форму и подвижные источники воздействия и с её применением получены математическая и дискретная модели, позволяющие моделировать температурные поля в активной зоне реакторной установки;
- разработана методика проведения моделирования тепловых процессов, протекающих в системах с распределенными параметрами с помощью распределенного апериодического звена;
- разработана методика расчета распределенных регуляторов для систем управления с подвижным источником воздействия, которая отличается от известных тем, что учитывает степень колебательности;
- разработана методика расчета распределенных регуляторов для систем управления с учетом желаемой передаточной функции объекта;
- разработаны методики оценки устойчивости нелинейных систем с распределенными параметрами;
- разработана методика расчета адаптивных систем контроля с распределенными параметрами;
- разработан программный комплекс для контроля параметров в реакторной установке, анализа и расчета систем управления.
- опираясь на полученные в результате работы методики, решена задача синтеза системы контроля тепловых полей в активной зоне атомного реактора.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Ляшенко, А.Л. Частотный анализ и синтез систем с распределенными параметрами: Монография / А.Л. Ляшенко, И.М. Першин. Изд. РИА-КМВ: Пятигорск, 2012. 152 с.

Статьи в центральных журналах перечня ВАК

2. Ляшенко, А.Л. Математическое моделирование распределенного объекта управления с подвижным источником воздействия / Ляшенко А.Л., Золотов О.И. - Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. 1 (115). С. 113-118

3. Ляшенко, А.Л. Анализ систем с распределенными параметрами на запас устойчивости по показателю колебательности / А.Л. Ляшенко, О.И. Золотов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №6. С.206-213.

4. Ляшенко, А.Л. Определение области устойчивости систем с распределенными параметрами методом расширенных частотных характеристик/ А.Л. Ляшенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. 3 (126). С. 73-77.

5. Ляшенко, А.Л. Применение метода расширенных частотных характеристик для анализа объектов с распределенными параметрами / А.Л. Ляшенко, И.М. Новожилов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. №5. С. 48-53.

6. Ляшенко, А.Л. Разработка номограмм для расчета настроек распределенного ПИД-регулятора/ А.Л. Ляшенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. 2 (145). С. 67-71.

7. Ляшенко, А.Л. Математическое моделирование тепловых процессов в активной зоне реактора / А.Л. Ляшенко, С.Л. Морева // Научный журнал «Научное обозрение». 2012. №2. С. 182 – 189.

8. Ляшенко, А.Л. Разработка методики синтеза распределенного П-регулятора по показателю колебательности / А.Л. Ляшенко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. 4 (152). С. 51-55.

9. Ляшенко, А.Л. Разработка математической модели температурных полей активной зоны реактора РБМК-1000/ А.Л. Ляшенко, С.Л. Морева, О.И. Золотов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. 4 (152). С. 79-84.

10. Ляшенко, А.Л. Синтез распределенного высокоточного регулятора по показателю колебательности для систем с распределенными параметрами/ А.Л. Ляшенко, Е.К. Грудяева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. №1. С. 13-53.

11. Ляшенко, А.Л. Применение частотных критериев качества для анализа систем с распределенными параметрами/ А.Л. Ляшенко // Научный журнал «Научное обозрение». 2013. №2. С. 138 – 142.
12. Ляшенко, А.Л. Анализ температурного поля цилиндрического объекта управления / А.Л. Ляшенко, И.А. Кучеренко, Ю.В. Ильюшин, С.Л. Морева // Научный журнал «Научное обозрение». 2013. №3. С. 71 – 75.
13. Ляшенко, А.Л. Разработка передаточной функции распределенного регулятора/ А.Л. Ляшенко // Научный журнал «Научное обозрение». 2013. №3. С. 89 – 90.
14. Ляшенко, А.Л. Применение принципов адаптации при разработке распределенных систем управления гидродинамическими процессами / А.Л. Ляшенко // Межотраслевой научно-технический журнал «Недропользование XXI век». 2014. №6а (44). С. 80-83.
15. Ляшенко, А.Л. Разработка адаптивной системы управления с распределенными ПИ-регулятором/ А.Л. Ляшенко, Ю.В. Ильюшин, В.Е. Трушников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №1. С. 341-346.
16. Ляшенко, А.Л. Моделирование температурных процессов на суперкомпьютере/ А.Л. Ляшенко, Ю.В. Ильюшин, И.А. Кучеренко, И.М. Новожилов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. №4. С. 42-46.
17. Ляшенко, А.Л. Решение задачи моделирования поведения температурного поля в распределенных объектах управления / А.Л. Ляшенко, Ю.В. Ильюшин, И.А. Кучеренко, И.М. Новожилов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. №7. С. 48-51.
18. Ляшенко, А.Л. Применение модифицированного метода Гольдфарба для исследования нелинейных систем с распределенными параметрами / А.Л. Ляшенко // Научный журнал «Научное обозрение». 2014. №10. С. 67 – 72.
19. Ляшенко, А.Л. Разработка системы управления расхода теплоносителя в технологических каналах атомного реактора с целью повышения гидроэкологической безопасности территории / А.Л. Ляшенко, С.Л. Морева, В.Е. Трушников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №5. С. 342-347.
20. Ляшенко, А.Л. Оценка устойчивости нелинейных систем с распределенными параметрами частотным методом/ А.Л. Ляшенко // Научный журнал «Научное обозрение». 2015. №8. С. 204 – 208.
21. Ляшенко, А.Л. Разработка системы управления шаговыми двигателями в парогенераторных установках/ А.Л. Ляшенко, И.М. Першин // Научный журнал «Записки горного института». 2015. Том 213. С. 62 – 71.
22. Ляшенко, А.Л. Модернизация системы контроля температуры теплоносителя в технологических каналах атомного реактора / А.Л. Ляшенко //

Современная наука и инновации. Научный журнал Выпуск. 2017. № 3 (19). С. 89 – 94.

23. Ляшенко, А.Л. Математическая модель тепловых процессов парового котла теплоэлектростанции / А.Л. Ляшенко // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. №5. С. 100-110.

Учебные пособия

24. Ляшенко, А.Л. Автоматизированные информационно-управляющие системы / А.Л. Ляшенко. СПб.:Изд-во СЗТУ, 2009. 115 с.

25. Ляшенко, А.Л. Теория автоматического управления (Специальные разделы) / А.Л. Ляшенко. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. 104 с.

26. Ляшенко А.Л. Алгоритмизация и управление техническими системами / А.Л. Ляшенко. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2012. 38 с.

27. Ляшенко, А.Л. Системы с распределенными параметрами / А.Л. Ляшенко. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2012. 81 с.

28. Ляшенко, А.Л. Приборы контроля и управления технологическими процессами / А.Л. Ляшенко. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. 76 с.

Статьи в рецензируемых журналах

29. Ляшенко, А.Л. Разработка программного комплекса для моделирования тепловых процессов в активной зоне реакторных установок/ А.Л. Ляшенко // Всероссийский научно-практический журнал «Народное хозяйство» Вопросы инновационного развития». 2012. №1. С.243-248

30. Ляшенко, А.Л. Корневой метод расчета настроек распределенного ПИД – регулятора для систем с распределенными параметрами/ А.Л. Ляшенко // Журнал «Компоненты и технологии». 2012. №1. С.146-150.

31. Ляшенко, А.Л. Разработка методики синтеза оптимальных распределенных систем управления / А.Л. Ляшенко // Журнал «Компоненты и технологии». 2013. №1. С.122-124.

Патенты на полезную модель

32. Ляшенко, А.Л. Карбидокремниевый нагревательный элемент с импульсными секционными нагревателями для сталелитейной электропечи // Ю.В. Ильющин, А.В. Комарских, А.Л. Кравцова, Д.А. Первухин, И.М. Першин, А.Б. Чернышев. Патент на полезную модель №142847 . Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 03 июня 2014 г.

33. Ляшенко, А.Л. Карбидокремниевый нагревательный элемент с импульсными секционными нагревателями для печи хлебопекарного назначения / Ю.В. Ильюшин, А.В. Комарских, А.Л. Кравцова, Д.А. Первухин, И.М. Першин, А.Б. Чернышев. Патент на полезную модель №142770. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 03 июля 2014 г.

Свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ

34. Ляшенко, А.Л. Моделирование распространения тепловых полей в объекте управления с распределенными параметрами соприкасающихся с жидкостью / А.В. Комарских, И.М. Першин, Д.А. Первухин, И.А. Кучеренко, Ю.В. Ильюшин. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013619131 от 26 сентября 2013г.

35. Ляшенко, А.Л. Моделирование температурного поля в трубе с учетом воздушной внутренней среды / И.А. Кучеренко, И.М. Першин, Д.А. Первухин, Ю.В. Ильюшин. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013661735 от 13 декабря 2013г.

36. Ляшенко, А.Л. Моделирование температурного поля многослойного объекта управления с распределенными параметрами / И.А. Кучеренко, Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин, Д.А. Первухин, А.Б. Чернышев. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013661620 от 11 декабря 2013г.

37. Ляшенко, А.Л. Моделирования процесса температурного поля на основе параллельного алгоритма синтеза регулятора гибридного суперкомпьютера / Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин, Д.А. Первухин, П.А. Пономарчук, А.В. Плотников. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613035 от 17 марта 2014г.

38. Ляшенко, А.Л. Анализ системы температурных полей, проходящих через границы разнородных сферических оболочек./ Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин, Д.А. Первухин, П.А. Пономарчук, А.В. Плотников. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613150 от 19 марта 2014г.

39. Ляшенко, А.Л. Расчет настроек тепловых полей в защитном термокожухе для видеокамеры охранного телевидения / Ю.В. Ильюшин. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613652 от 02 апреля 2014г.

40. Ляшенко, А.Л. Расчет настроек распределенного ПИД-регулятора./ Ю.В. Ильюшин. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014613656 от 02 апреля 2014г.

41. Ляшенко, А.Л. Программный комплекс расчета температурных, вибрационных, траекторных, стохастических и статистических характеристик сложных систем управления. / Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин, Д.А. Первухин, П.А. Пономарчук, А.В. Плотников. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016615152 от 09 марта 2016г.

Свидетельства о государственной регистрации баз данных

42. Ляшенко, А.Л. База данных комплексных характеристик сложных систем управления / Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин, Д.А. Первухин, О.В. Афанасьева, М.П. Афанасьев. Свидетельство о государственной регистрации баз данных № 2016620522 от 09 марта 2016г.

Доклады на международных конференциях

43. Ляшенко, А.Л. Синтез распределенного высокоточного регулятора с использованием частотных методов для системы управления объектом имеющего подвижный источник воздействия // Системный синтез и прикладная синергетика: Международная научная конференция 03-05 октября 2006г. Пятигорск. Сборник докладов. С. 276-282.

44. Ляшенко, А.Л. Синтез распределенной системы управления для объекта имеющего подвижный источник воздействия // Системный синтез и прикладная синергетика: Международная научная конференция 29.09-02.10. 2009г. Пятигорск. Сборник докладов, 2009. С. 387-392.

45. Ляшенко, А.Л. Исследование устойчивости объектов с распределенными параметрами // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию СЗТУ «Системы и процессы управления и обработки информации». Том 2. СПб.:СЗТУ, 2010. С. 355-360.

46. Ляшенко, А.Л. Моделирование объектов с распределенными параметрами // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию СЗТУ «Системы и процессы управления и обработки информации». Том 2. СПб.:СЗТУ, 2010. С. 360-369.

47. Ляшенко, А.Л. Разработка программного обеспечения для расчета настроек распределенного регулятора для систем с распределенными параметрами // Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления. I часть. СПб.: СЗТУ, 2010. С. 257-263.

48. Ляшенко, А.Л. Оценка запаса устойчивости систем с распределенными параметрами методом расширенных частотных характеристик // Современные телекоммуникационные системы и компьютерные сети: перспективы развития: Труды международной конференции. СПб.: СПбГАСУ, 2011. С. 131-137

49. Ляшенко, А.Л. Разработка программного обеспечения для моделирования тепловых полей в объектах с распределенными параметрами // Труды XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления. II часть. СПб.: СЗТУ, 2011. С. 55-63.

50. Ляшенко, А.Л. Синтез П-регулятора для систем с распределенными параметрами // Труды XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления. II часть. СПб.:СЗТУ, 2011. С. 63-69

51. Ляшенко, А.Л. Синтез распределенного П-регулятора по показателю колебательности для систем с распределенными параметрами // Материалы четвертой Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Таганрог.: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2011. С.212-218.

52. Ляшенко, А.Л. Определение области устойчивости распределенных систем управления с распределенным ПИД-регулятором // Аналитическая механика, устойчивость и управление: Труды X Международной Четаевской конференции. Т.2 Секция 2. Устойчивость. Казань, 12-16 июня 2012 г. Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. С. 353-360.

53. Ляшенко, А.Л. Расчет настроек оптимального распределенного ПИ-регулятора // Материалы Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и её приложения» (МФП-2012). Т2. Пятигорск: СКФУ, 2012. С. 35-37.

54. Ляшенко, А.Л. Разработка адаптивного управления для системы с распределенными параметрами/ А.Л. Ляшенко, С.Л. Морева // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. в 3-х томах. Донецк, ДонНТУ, 2013. Т.2. С. 95 – 98.

55. Ляшенко, А.Л. Разработка методики расчета настроек оптимального ПИ-регулятора для системы с распределенными параметрами // Материалы Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и её приложения» (МФП-2012). Пятигорск: СКФУ. Т2. С.31-34.

56. Liashenko, A. Development of transfer function space-a-periodic member/ Materialy IX mezinarnodni vedecko – prakticka conference «Moderni vymozenosti vedy – 2013». Dil 68. Matematika: Praga. Publishing House «Education and Science» s.r.o. s. 28 – 31

57. Liashenko, A. Developing systems with optimal adaptive transfer function/ Материали за 9-а международна научна практична конференция, «Научният потенциал на света», - 2013. Том 21. Технологии. София. «Бялт ГРАД-БГ» ООД. С. 82-85

58. Ляшенко, А.Л. Разработка адаптивного управления для системы с распределенными параметрами // Машиностроение и техносфера XXI века:

Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. в 3-х томах. Донецк, ДонНТУ, 2013. Т.2. С. 95 – 98

59. Ляшенко, А.Л. Разработка адаптивной системы управления с распределенным ПИ-регулятором // Материалы пятой Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика». Пятигорск.: ФГАОУ ВПО «СКФУ», 2013. С. 219-224.

60. Ляшенко, А.Л. Разработка нелинейной системы с распределенными параметрами // Материалы пятой Международной научной конференции «Петербургская школа поточной организации строительства». СПб.: СПбГАСУ, 2014. С.64-67.

61. Ляшенко, А.Л. Автоматизация процесса управления запорно-регулирующим клапаном в реакторе РМБК-1000 // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов III международной научно-практической конференции. Том III / Под ред. В.В. Максарова. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. С. 47 – 51.

62. Ляшенко, А.Л. Модификация метода Гольдфарба для систем с распределёнными параметрами // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте: Труды XVI Международной научно-практической конференции. Молодых ученых, студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 21-23 апреля 2015 г. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2016. С. 213 – 218.

63. Ляшенко, А.Л. Моделирование гидродинамического удара в трубопроводах // Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте: Труды XVI Международной научно-практической конференции. Молодых ученых, студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 21-23 апреля 2015 г. СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2016. С. 224 – 229.

64. Ляшенко, А.Л. Анализ и моделирование технологических процессов в паровых котлах // Энергетика, экология и бизнес. Материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 31 мая 2018. С. 27 – 30.

Статьи в сборниках статей и всероссийские конференции

65. Ляшенко, А.Л. Синтез регулятора для распределенной системы управления с подвижным источником воздействия // «Управление и информационные технологии» Межвузовский научный сборник, Пятигорск 2006. С. 28-31.

66. Ляшенко, А.Л. Распределенная система управления с подвижным источником воздействия// «Управление и информационные технологии» Межвузовский научный сборник. Пятигорск, «РИА-КМВ», 2007. С. 32-37.

67. Ляшенко, А.Л. Частотный анализ объектов с распределёнными параметрами с помощью расширенных частотных характеристик// Материалы

6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ - 2010). СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. С. 65-70.

68. Ляшенко, А.Л. Выводы передаточной функции распределенного пространственного – апериодического звена // Сборник научных статей к юбилею кафедры процессов управления и информационных систем.- СПб.: Изд-во СЗТУ, 2010. с.99-105.

69. Ляшенко, А.Л. Разработка специального программного обеспечения для моделирования объектов с распределенными параметрами// Материалы всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития профессионального образования в современных социально-экономических условиях». Кисловодск.: Изд-во «Тьютор», 2011. С.120-124.

70. Ляшенко, А.Л. Разработка передаточной функции распределенного регулятора // Материалы всероссийской научной конференции «Вузовская наука Северо-Кавказскому федеральному округу». Пятигорск: ФГАОУ ВПО «СКФУ» в Пятигорске, 2013. Т2. (ч1). С. 213-215.

71. Ляшенко, А.Л. Моделирование гидравлического удара в трубопроводах// Актуальные проблемы гидролитосферы: Третий национальный научный форум «Нарзан 2015» 32.09.2015-25.09.2015 г. Кисловодск: Сборник докладов. Пятигорск: РИА-КМВ, 2015. С. 632- 640.

72. Ляшенко, А.Л. Синтез распределенной системы управления тепловыми полями в парогенераторных установках // Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. С. 131-138.

73. Ляшенко, А.Л. Компьютерное моделирование гидродинамических процессов в трубопроводах // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах: Материалы конференции. Санкт-Петербург. 28 – 30 октября 2015 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 135-137.

74. Ляшенко, А.Л. Применение частотных методов анализа и синтеза распределенных систем управления тепловыми полями в энергетических установках// Завалишинские чтения 2016: Сборник докладов, 11-15 апреля 2016. СПб.: ГУАП, 2016 с 163-167.

75. Ляшенко, А.Л. Разработка программного обеспечения для моделирования тепловых процессов в активной зоне реактора РМБК – 1000 // Восьмая всероссийская научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД – 2017, 18-20 октября 2017, с. 268 – 271.

76. Ляшенко, А.Л. Система управления тепловыми полями теплоносителя в технологических каналах атомного реактора / VIII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных

трудов. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. С. 337-345.

77. Ляшенко, А.Л. Разработка адаптивной системы управления тепловыми полями теплоносителя в активной зоне атомного реактора / Завалишинские чтения 2018, Сборник докладов, 16-20 апреля 2018, СПб.: ГУАП, 2018 с 73-78.