

На правах рукописи

**Артур Мария Хамильевна**

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ  
ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ  
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

**Самара – 2018**

Работа выполнена на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: Плешивцева Юлия Эдгаровна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: Першин Иван Митрофанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления и информационных технологий Института сервиса, туризма и дизайна (филиала) ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Пятигорск

Галунин Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехнологической и преобразовательной техники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Отзывы о данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.07, тел.: (846) 278-44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: 212.217.07@mail.ru.

В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте диссертационного совета Д 212.217.07 <http://d21221707.samgtu.ru>.

Защита диссертации состоится «3» декабря 2018 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.217.07 в Самарском государственном техническом университете по адресу: 443010, г. Самара, ул. Галактионовская, 141 корпус № 6, аудитория 33.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.217.07,  
доктор технических наук, профессор

А.М. Абакумов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования и степень ее разработанности**

Возрастающие требования к качеству готовой продукции и необходимости уменьшения энерго- и трудозатрат на ее изготовление обуславливают развитие и усложнение производственных процессов и технологий. В целях обеспечения предельно возможных технико-экономических показателей работы производственного оборудования необходимо не только развивать известные, но и разрабатывать новые методы усовершенствования конструкционных характеристик и соответствующей организации режимов функционирования применяемого оборудования, оптимальных по выбранным критериям эффективности.

Широко распространенные методы классической теории автоматического управления, разработанные для процессов, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями, часто не позволяют получить корректные решения практических задач оптимизации, поскольку большинство технологических процессов описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, так как их функции состояния обладают пространственной распределенностью. Необходимость построения систем автоматического управления такими процессами послужила причиной создания теории управления системами с распределенными параметрами (СРП) и развития ее методов.

Решению задач оптимизации распределенных систем с посвящены работы Бутковского А.Г., Егорова А.И., Егорова Ю.В., Лионса Ж.Л., Сиразетдинова Т.К., Рапопорта Э.Я., Коваля В.А. и др. Многие разработанные к настоящему времени методы синтеза систем управления объектами с распределенными параметрами нашли широкое применение в промышленности.

Одна из основных проблем теории управления СРП заключается в поиске алгоритмов управления для перевода объекта в требуемое конечное состояние при обеспечении экстремальных значений оптимизируемых показателей качества процесса. Характерной задачей этого типа является задача оптимального управления (ЗОУ) процессом индукционного нагрева металлических полуфабрикатов для обеспечения их необходимых температурных кондиций перед операциями обработки давлением. Проблемы оптимизации по различным критериям эффективности конструкционных характеристик и режимов работы индукционных нагревателей как объектов с распределенными параметрами (ОРП) исследуются в работах Рапопорта Э.Я., Зимина Л.С., Данилушкина А.И., Коломейцевой М.Б., Лившица М.Ю., Плешивцевой Ю.Э. и др.

В кузнечном производстве индукционный нагрев стали вытесняет обычную технологию нагрева в печах, работающих на топливе. Доля индукционного нагрева в кузнечно-штамповочном производстве составляет примерно 80%. Кроме того, проведенные сравнения печей и установок с производительностью 1-2 т/час показали, что печи, работающие на газовом топливе, имеют значительно большее удельное потребление конечной энергии, чем электротермические агрегаты, что объясняется отчасти

большим образованием окалина на поковках (от 2,5% в газовых печах, до 0,5% при индукционном нагреве). Широкая и непрерывно увеличивающаяся область применения энергоемкой технологии индукционного нагрева металла перед обработкой давлением указывает на актуальность внедрения энергоэффективных систем оптимального управления этим технологическим процессом.

Большая часть работ по оптимизации процессов индукционного нагрева направлена на поиск оптимального программного управления в условиях наличия полного объема информации об управляемом ОРП. Задачи синтеза замкнутых систем оптимального управления в реальных условиях неполного измерения состояния и воздействия различных возмущений являются значительно более сложными, а методы их решения сравнительно мало разработаны.

Возмущения, возникающие в процессе индукционного нагрева, оказывают негативное влияние на температурное поле заготовки, отклоняя его от требуемого. При достаточно широком диапазоне возможных величин возмущений такие отклонения могут быть весьма существенными и приводить не только к ухудшению качества процессов управления, но и к несоответствию результирующих температурных кондиций предъявляемым технологическим требованиям и, как следствие, к браку конечной продукции и существенным энергетическим потерям. Применение системы оптимального управления температурным режимом индукционного нагрева с обратной связью по температуре заготовки позволяет минимизировать создаваемые возмущениями отклонения температурного поля от требуемого распределения и тем самым повысить качество и обеспечить снижение себестоимости готовых изделий за счет сокращения энергозатрат. Это обуславливает актуальность задачи построения замкнутой системы оптимального управления, которая формулируется в диссертации как задача аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР).

В реальных производственных условиях обычно невозможно добиться полного согласования во времени работы индукционных нагревательных установок (ИНУ) и деформирующего оборудования, в связи с этим возникают временные задержки между операциями нагрева и деформации, которые также приводят к нарушению обусловленных технологией температурных режимов нагрева и пластической деформации, что негативно отражается на качестве изделий. Замкнутые оптимальные системы управления температурными режимами индукционного нагрева обеспечивают не только достижение требуемых температурных кондиций, но и стабилизацию температурных распределений в течение необходимого до начала операций обработки давлением времени в условиях действующих в системе возмущений.

Применение метода динамического программирования для решения задачи АКОР позволяет получить закон управления в системе с обратной связью в аналитической форме, которая оказывается достаточно простой для технической реализации системы на базе типовых измерительных устройств и программируемых контроллеров.

Перечисленные обстоятельства подтверждают актуальность рассматриваемой в диссертационной работе задачи оптимизации процесса индукционного нагрева металлической заготовки с целью синтеза алгоритма оптимального управления в замкнутой системе в условиях всегда неполного измерения состояния объекта. В качестве минимизируемого критерия оптимальности выбрана взвешенная сумма интегральной квадратичной погрешности приближения управляемого температурного поля к заданному равномерному распределению и энергетических затрат на процесс управления. Полученные результаты, апробированные на численных нелинейных моделях взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в процессе нагрева стальной цилиндрической заготовки перед обработкой давлением, использованы в расчетно-проектной практике.

**Целью диссертационной работы** является повышение энергетической эффективности и снижение потерь от погрешности достижения требуемых температурных кондиций металлических полуфабрикатов в процессе их индукционного нагрева путем создания замкнутой системы автоматического управления температурным режимом нагрева с аналитически сконструированным оптимальным регулятором в условиях неполного измерения функции состояния объекта управления.

Для достижения указанной цели в диссертации решаются следующие **задачи**:

1. Разработка методики решения задачи АКОР, сформулированной как задача векторной оптимизации температурных режимов индукционного нагрева с критерием оптимальности в форме линейной свертки типовых показателей качества, представляющей собой взвешенную сумму интегральной квадратичной ошибки регулирования и расхода энергии на процесс управления, в условиях неполного измерения состояния объекта управления.

2. Получение алгоритма оптимального управления температурным режимом процесса индукционного нагрева в замкнутой системе при измерении температуры в единственной фиксированной точке заготовки.

3. Разработка и верификация нелинейных численных моделей взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в технологическом процессе индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок в замкнутой системе оптимальной стабилизации температурных кондиций нагреваемых заготовок.

4. Исследование разработанного алгоритма оптимальной стабилизации температурных режимов индукционного нагрева в замкнутых системах управления с обратной связью по температуре, измеряемой в единственной фиксированной точке заготовки, с использованием численных нелинейных моделей взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей.

5. Анализ результатов и обоснование их эффективности и практической применимости при построении замкнутых оптимальных систем управления температурными режимами индукционного нагрева в условиях неполного объема информации о технологическом процессе.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы методы численного и компьютерного

моделирования, теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, теории автоматического управления, теории теплопроводности и электромагнетизма.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты, обладающие научной новизной:

1. На основе метода динамического программирования разработана новая методика решения задачи синтеза алгоритма управления температурным режимом индукционного нагрева, оптимального по критерию, представляющему собой взвешенную сумму типовых показателей качества, применительно к одномерной модели ОРП с нелинейными граничными условиями, учитывающими теплотери за счет излучения и конвекции, в условиях неполного измерения распределенной функции состояния объекта.

2. В аналитической форме получен алгоритм оптимального управления в системе с обратной связью по температуре, измеряемой в одной фиксированной точке заготовки, который обеспечивает минимум среднеквадратичной интегральной ошибки отклонения распределения температурного поля от заданного при минимальном расходе энергии на процесс управления.

3. Разработаны проблемно-ориентированные нелинейные численные модели взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в процессе периодического индукционного нагрева стальных заготовок цилиндрической формы, позволяющие исследовать температурные режимы индукционного нагрева в системе оптимальной стабилизации с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек заготовки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика решения задачи синтеза замкнутой системы автоматической стабилизации температурного поля заготовки в процессе индукционного нагрева, сформулированной как задача векторной оптимизации с критерием в форме линейной свертки типовых показателей качества, представляющей собой взвешенную сумму интегральной квадратичной ошибки регулирования и расхода энергии на процесс управления, в условиях неполного измерения состояния объекта.

2. Алгоритм оптимального управления процессом индукционного нагрева в системе с обратной связью по температуре, измеряемой в одной фиксированной точке заготовки, который обеспечивает минимум среднеквадратичной интегральной ошибки отклонения распределения температурного поля металлических полуфабрикатов от заданного при минимальном расходе энергетических ресурсов.

3. Проблемно-ориентированная двумерная нелинейная численная модель взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в процессе периодического индукционного нагрева стальных заготовок цилиндрической формы в замкнутой системе оптимальной стабилизации температурного режима нагрева с обратной связью по температуре, измеряемой в фиксированной точке заготовки.

4. Результаты анализа оптимальных температурных режимов индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок в замкнутых

системах управления с обратной связью по температуре заготовки, измеряемой в одной из точек с заданными координатами.

**Практическая значимость диссертации.** Разработанные в диссертации методики, алгоритмы и модели могут быть использованы для синтеза замкнутых систем оптимального управления температурными режимами периодического индукционного нагрева, а также для решения задач моделирования, анализа и оптимизации объектов технологической теплофизики с распределенными параметрами, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа.

Применение полученных в диссертационном исследовании результатов при управлении процессами индукционного нагрева обеспечит повышение точности стабилизации температурных кондиций нагреваемых заготовок и снижение расхода энергии на процесс управления по сравнению с типовыми технологиями нагрева металлических полуфабрикатов перед обработкой давлением.

**Реализация результатов исследований.** Полученные в работе теоретические положения и практические результаты использованы:

- при выполнении научных исследований по темам «Оптимальное проектирование проходных индукционных нагревателей для технологического комплекса «нагрев-обработка давлением» и «Разработка оптимальных алгоритмов управления численными моделями процесса индукционного нагрева», выполненных по программе «Леонард Эйлер» при поддержке Немецкого фонда академических обменов (DAAD) (2009 г., 2011 г.);

- при выполнении НИР по проекту «Создание энергосберегающих систем потребления электроэнергии мощными электротехнологическими комплексами обработки металла давлением», государственный контракт № П1448 от 09.03.2009 г. по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2009-2011 г.;

- при выполнении НИР по проекту «Разработка энергосберегающих технологий оптимального проектирования и управления мощными индукционными нагревательными установками» (Поисковые гранты по стратегическим направлениям развития науки и высоких технологий, Общественный фонд содействия отечественной науке, 2012 г.);

- при выполнении НИР по проектам Российского Фонда Фундаментальных Исследований «Теория и вычислительные алгоритмы специального метода совместной оптимизации по системным критериям качества взаимосвязанных объектов технологической теплофизики в составе производственных комплексов обработки металла давлением» (№ 13-08-00926) и «Разработка научно-технических основ интегрированного оптимального проектирования и многокритериального управления электротермическими установками для нагрева металлических полуфабрикатов перед последующей обработкой давлением» (№ 16-08-00945);

- при выполнении НИР по проектам «Теория построения и методы реализации стратегий программного и позиционного управления

техническими объектами с распределенными параметрами» (проект 7.668.2011) и «Оптимизация по критериям ресурсной ценности, энергосбережения и экологической безопасности организационно-технической системы утилизации отходов нефтегазового комплекса» (проектная часть госзадания, проект №10.3260.2017/4.6) в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ.

Материалы диссертационных исследований использованы в расчетно-проектной практике в ООО «Камет» и ПАО «Салют», а также в учебном процессе в ФГБОУ ВО «СамГТУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах» и бакалавров по направлению 27.03.03 «Системный анализ и управление».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (2008 г., г. Томск); Международной научно-технической конференции «Информационные, измерительные и управляющие системы» (ИИУС-2010) (2010 г., г. Самара); Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (2010 г., г. Самара); XIV, XV, XVI Международных конференциях «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (2012 г., 2013 г., 2014 г., г. Самара); Международной научно-технической конференции «Автоматизация» (RusAutoCon) (2018 г., г. Сочи).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 1 научная статья в издании, индексируемом в базе SCOPUS, и 4 научных статьи в периодических рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 140 страницах, состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы из 114 наименований, содержит 50 рисунков, 6 таблиц и 2 приложения.

#### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность и степень разработанности выбранной темы диссертации, сформулированы цель, основные задачи работы и ее научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту, кратко охарактеризована практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** рассмотрена проблема синтеза систем оптимального управления техническими объектами с распределенными параметрами. Перечислены основные особенности задач оптимального управления объектами с распределенными параметрами, значительно усложняющие разработку методов их решения по сравнению подобными задачами оптимального управления сосредоточенными объектами.

Показано, что в общем случае задачи оптимального управления ОРП формулируются либо как задачи программного управления, обеспечивающего перевод объекта из заданного начального в требуемое

конечное состояние, либо как задачи стабилизации (с необходимой точностью) заданных состояний объекта в системе с обратными связями при наличии воздействующих на ОРП возмущений. При этом при решении задач определения управляющих воздействий в замкнутых оптимальных системах стабилизации существенно используются решения задач программного оптимального управления ОРП.

В наиболее общем виде сформулирована задача синтеза замкнутой оптимальной СРП, которая сводится к определению управляющего воздействия как функции управляемой величины, позволяющего осуществить перевод объекта из заданного начального в требуемое конечное состояние с учетом заданных ограничений и обеспечивающего экстремальное значение выбранного показателя качества. Специфическая особенность рассматриваемой задачи заключается в невозможности получения полной информации о функции состояния управляемого объекта в виду ограниченных возможностей измерительных устройств.

Проведен обзор современных методов решения задач оптимального управления ОРП. Показано, что для решения задач программного оптимального управления могут применяться необходимые условия оптимальности либо непосредственно в форме принципа максимума Понтрягина, либо в специальных формах его обобщения на случай распределенных систем, описываемых интегральными соотношениями или уравнениями в частных производных. Кроме того, эффективные решения сложных краевых задач оптимального управления ОРП при заданных конечных состояниях могут быть получены с помощью вычислительных алгоритмов, основанных на методе моментов.

Существующие методы синтеза распределенных систем в большинстве своем требуют разработки сложных численных процедур. Наиболее распространенными численными методами определения оптимальных программных управляющих воздействий являются методы градиентного поиска и редукции к задачам математического программирования после предварительной параметризации управляющих воздействий.

Рассмотрены известные способы аналитического решения задач синтеза замкнутых систем автоматической оптимизации ОРП, которые, в основном, используют метод динамического программирования или непосредственно опираются на необходимые условия экстремума в форме соответствующего принципа максимума. При этом следует отметить, что даже в простейших случаях типовых постановок линейно-квадратичных задач аналитического конструирования регуляторов, их решения сводятся к сложным нелинейным системам интегро-дифференциальных уравнений, которые могут быть разрешены аналитически лишь в частных случаях.

Рассмотрены вопросы, связанные с проблемами управляемости и наблюдаемости ОРП. Показано, что исследование управляемости ОРП является сложной проблемой, и во многих случаях проще, используя необходимые условия управляемости выявить заведомо неуправляемые объекты. Переход от задач с требованием точного попадания в заданное фиксированное конечное состояние объекта к задачам с подвижным правым концом траектории открывает множество возможностей для получения

алгоритмически точных и практически реализуемых решений задач управления СРП.

Рассматривается возникающая при построении замкнутых систем управления проблема наблюдаемости управляемого ОРП, заключающаяся в определении возможности восстановления управляемого распределенного выхода объекта по результатам его практически всегда неполного измерения и в разработке способов построения устройств (наблюдателей), реализующих такую возможность.

Представлена содержательная постановка задачи исследования, которая сводится к поиску алгоритма оптимальной стабилизации функции состояния технологического ОРП в системе с обратной связью при неполном измерении функции состояния объекта. В качестве объекта управления рассматривается широко применяемый в промышленности технологический процесс индукционного нагрева металла перед последующей обработкой давлением. Задачу синтеза алгоритма оптимального управления предлагается формулировать как задачу векторной оптимизации с критерием в форме линейной свертки типовых показателей качества, представляющей собой взвешенную сумму интегральной квадратичной ошибки регулирования и расхода энергии на процесс управления, в условиях неполного измерения состояния объекта.

**Во второй главе** рассматривается задача синтеза замкнутой системы автоматической стабилизации температурного режима технологического процесса индукционного нагрева металлических заготовок перед операциями пластического формоизменения.

Процесс индукционного нагрева цилиндрической заготовки рассматривается как объект управления с распределенными параметрами. Показано, что при решении задачи оптимального управления конкретным технологическим процессом индукционного нагрева необходимо сформулировать требования к конечному состоянию нагреваемой заготовки, выбрать надлежащий критерий оптимальности, адекватную модель для описания процесса, учесть существующие ограничения на управляющее воздействие и управляемую функцию состояния. Кроме того, при постановке ЗОУ процессом индукционного нагрева металла (ПИНМ) необходимо учитывать возмущения, которые оказывают негативное влияние на температурное поле заготовки, что может приводить к значительным потерям качества процессов управления или даже к результатам, не удовлетворяющим технологическим требованиям.

Построение системы оптимального управления с обратной связью по температуре заготовки позволяет минимизировать создаваемые возмущения отклонения температурного поля от заданного распределения и, тем самым, обеспечить требуемое качество и снизить себестоимость готовых изделий.

В диссертации рассмотрена постановка задачи синтеза алгоритма оптимального управления ПИНМ в замкнутой системе стабилизации температурного поля  $\Theta(x,t)$ , изменяющегося во времени  $t$  и по пространственной радиальной координате  $x$  в центральном поперечном

сечении цилиндрической заготовки радиусом  $R$ , относительно заданной температуры  $\Theta_{mp}$ .

В качестве пространственно-временного управляющего воздействия для рассматриваемого технологического процесса индукционного нагрева принимается мощность внутренних источников тепла  $F(x, t)$ .

Для получения алгоритма оптимального управления в форме явной зависимости от сигнала обратной связи по температуре, на этапе формулировки и аналитического решения задачи оптимального управления в качестве математической модели процесса индукционного нагрева целесообразно использовать упрощенное линейное уравнение Фурье следующего вида:

$$\frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \Theta(x, t)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \Theta(x, t)}{\partial x} \right) + \frac{1}{c\gamma} F(x, t); \quad (1)$$

$$x_0 < x < x_R, 0 < t \leq t_k,$$

с нелинейными краевыми условиями:

$$\Theta(x, 0) = \Theta_0(x); \quad x \in [x_0, x_R]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta(x_0, t)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta(x_R, t)}{\partial x} = \alpha(\Theta_{cp} - \Theta(x_R, t)) + \sigma_{CB} \varepsilon_{cm} \left( (\Theta_{cp}^4 - \Theta^4(x_R, t)) \right); \quad (3)$$

$$0 < t \leq t_k,$$

где  $\Theta_{cp}$  - температура окружающей среды,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\gamma$  - плотность,  $a = \lambda / c\gamma$  - температуропроводность,  $\alpha$  - коэффициент теплообмена,  $\sigma_{CB}$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $\varepsilon_{cm}$  - степень черноты стали.

Мощность внутренних источников тепла  $F(x, t)$  в уравнении (1) определяется мощностью индуктора. Для случая симметричного нагрева цилиндрической заготовки ее можно представить в виде следующего выражения:

$$F(x, t) = W(x) F^*(t), \quad (4)$$

где  $F^*(t)$  - сосредоточенное управление интенсивностью внутренних источников тепла, а функция  $W(x)$  описывает пространственное распределение внутренних источников тепла:

$$W(x) = \hat{\xi} \frac{ber'^2 \hat{\xi} x / R + bei^2 \hat{\xi} x / R}{2(ber \hat{\xi} ber' \hat{\xi} + bei \hat{\xi} bei' \hat{\xi})}, \quad (5)$$

где  $\hat{\xi} = R \sqrt{2\pi f \mu_a \sigma}$ ,  $f$  - частота питающего индуктор тока,  $\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость,  $\sigma$  - удельная электропроводность,  $ber$  и  $bei$  - функции Кельвина.

Задача оптимального управления сформулирована как задача векторной оптимизации по критерию:

$$I = \int_0^{t_k} S dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $S$  - аддитивная свертка типовых показателей качества рассматриваемого технологического процесса индукционного нагрева металла перед формообразованием, представляющая собой взвешенную сумму интегральной квадратичной ошибки приближения температурного поля к заданному распределению и энергетических затрат на реализацию процесса управления:

$$S = \int_{x_0}^{x_R} \int_{x_0}^{x_R} \omega_1(x, \xi) (\Theta(x, t) - \Theta_{mp}) (\Theta(\xi, t) - \Theta_{mp}) dx d\xi + \omega_2 \int_{x_0}^{x_R} F^2(x, t) dx, \quad (7)$$

здесь  $\omega_1(x, \xi)$ ,  $\omega_2$  - весовые коэффициенты. Входящие в минимизируемую функцию (7) типовые критерии являются конфликтующими, поскольку они не могут одновременно достигать экстремальных значений, что и обуславливает формулировку рассматриваемой задачи как задачи векторной оптимизации. В критерии (6) уже содержится требование к конечному состоянию системы и, следовательно, сформулированная задача представляет собой задачу со свободным правым концом траектории, что снимает существенные затруднения, связанные с достижением требуемых пространственных распределений температурного поля в конце процесса нагрева в ЗОУ с фиксированным правым концом траектории.

Для рассматриваемого технологического процесса можно не учитывать ограничения на поведение температурного поля заготовки  $\Theta(x, t)$  в связи с тем, что его отклонения от требуемого распределения не превышают предельно допустимых значений. Кроме того, полагая, что малым отклонениям  $\Theta(x, t) - \Theta_{mp}$  соответствуют малые изменения управляющего воздействия  $F(x, t)$ , можно считать, что при оптимальном управлении не достигаются ограничения на управляющее воздействие.

Исходя из сказанного, в работе сформулирована следующая ЗОУ: для объекта, описываемого уравнением (1) с крайними условиями (2), (3), требуется найти алгоритм управления  $F^*(\Theta, t)$  с обратной связью по температуре, обеспечивающий минимум критерия оптимальности (6) без учета ограничений на управляющее воздействие и поведение температурного поля.

Задача синтеза алгоритма оптимального управления рассматривается в условиях неполного измерения состояния ОРИ, когда вся доступная информация об управляемой функции состояния, в качестве которой выступает температурное распределение  $\Theta(x, t)$  по радиусу нагреваемой заготовки, исчерпывается доступными для измерения значениями температуры. Поскольку в рассматриваемой задаче управляющее воздействие представлено в виде произведения (4) изменяющегося во времени сосредоточенного управляющего воздействия  $F^*(t)$  и заранее фиксируемой функции его пространственного распределения  $W(x)$ , то для синтеза внутреннего сосредоточенного управляющего воздействия  $F^*(t)$

можно использовать сосредоточенные сигналы измерения функции состояния системы в отдельных фиксированных точках заготовки.

В диссертации рассматривается наиболее простой для технической реализации случай с единственным точечным безынерционным измерителем состояния, выходом которого является значение температуры  $\Theta_M(t)$ , являющееся результатом измерения управляемой функции состояния  $\Theta(x,t)$  в точке  $x=x_M$ , которое описывается пространственно-временной композицией функции Грина измерителя  $G_M(x)$  и  $\Theta(x,t)$  следующего вида:

$$\Theta_M(t) = \int_{x_0}^{x_R} G_M(x) \Theta(x,t) dx ; \quad (8)$$

$$G_M(x) = \delta(x - x_M), \text{ при } x_M \in [x_0, x_R]. \quad (9)$$

Оптимальное управление определяется с помощью метода динамического программирования, основное уравнение которого имеет следующий вид:

$$\min_{F^*(t)} \left( \frac{dV}{dt} + S(t) \right) = \left( \frac{dV}{dt} + S(t) \right)_{F^*(t)=F_{opt}^*(t)} = 0, \quad (10)$$

здесь  $V$  – функция Беллмана, определяемая следующим выражением:

$$V = \int_{x_0}^{x_R} \int_{x_0}^{x_R} v(x, \xi) (\Theta_M(t) - \Theta_{mp})^2 dx d\xi, \quad (11)$$

где  $v(x, \xi)$  – подлежащая определению функция пространственных координат.

Поскольку  $\Theta_M(t)$ - сосредоточенный сигнал, не зависящий от пространственных координат, выражение (11) можно записать следующим образом:

$$V = Z (\Theta_M(t) - \Theta_{req})^2, \quad Z = \int_{x_0}^{x_R} \int_{x_0}^{x_R} v(x, \xi) dx d\xi. \quad (12)$$

При выполнении равенства

$$v(x, \xi) = G_M(x) Z G_M(\xi), \quad (13)$$

с учетом уравнения измерения (8) выражение (12) можно записать следующим образом:

$$V = \int_{x_0}^{x_R} \int_{x_0}^{x_R} G_M(x) Z G_M(\xi) \left( (\Theta(x,t) - \Theta_{mp}) (\Theta(\xi,t) - \Theta_{mp}) \right) dx d\xi. \quad (14)$$

Далее из условия минимизации суммы  $(dV/dt) + S$  по  $F$ , которое без учета ограничений на управляющее воздействие сводится к равенству:

$$\frac{\partial [(dV/dt) + S]}{\partial F} = 0; \text{ для всех } t \in (0, t_k), \quad (15)$$

после некоторых преобразований с учетом выражения (14) можно определить алгоритм оптимального управления в искомой форме закона обратной связи по управляемой функции состояния:

$$F_{onn}^*(\Theta_M, t) = - \left( Z / c\gamma\omega_2 \int_{x_0}^{x_R} W^2(x) dx \right) (\Theta_M(t) - \Theta_{mp}) W(x_M). \quad (16)$$

Определяющее равенство (13) при  $Z=const \neq 0$  возможно обеспечить для коэффициента  $\omega_1(x, \xi)$  только определенного вида, который можно определить аналитически из условия равенства нулю суммы  $(dV/dt) + S$  при  $F=F_{onn}$  в (10), если на координату точки измерения наложить ограничение следующего вида:

$$x_0 < x_M < x_R. \quad (17)$$

Минимизируемая функция (7) после подстановки найденного весового коэффициента  $\omega_1(x, \xi)$  будет иметь следующий вид:

$$S(t) = \omega^* (\Theta(x_M, t) - \Theta_{mp})^2 + \frac{Z^2 W^2(x_M)}{\omega^* (c\gamma)^2 \int_{x_0}^{x_R} W^2(x) dx} F^{*2}(t) \int_{x_0}^{x_R} W^2(x) dx - \quad (18)$$

$$- 2Z (\Theta(x_M, t) - \Theta_{mp}) \left( a \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\Theta(x_M, t) - \Theta_{mp}) + \frac{a}{x_M} \frac{\partial}{\partial x} (\Theta(x_M, t) - \Theta_{mp}) \right),$$

где  $\omega^*$  - нормированный весовой коэффициент, определяемый следующим выражением:

$$\omega^* = \frac{Z^2 W^2(x_M)}{\omega_2 (c\gamma)^2 \int_{x_0}^{x_R} W^2(x) dx}. \quad (19)$$

Оптимальное управление (16) доставляет минимум критерию (6) при подынтегральной функции, определяемой согласно (18), что обеспечивает минимум взвешенной суммы отклонения температуры в точке измерения от требуемой и минимум энергетических затрат.

Выражение, определяющее значение критерия (6) при оптимальном управлении (16), имеет следующий вид:

$$I = \int_0^{t_k} S(t) dt = Z (\Theta(x_M, 0) - \Theta_{mp})^2 - Z (\Theta(x_M, t_k) - \Theta_{mp})^2 \quad (20)$$

Таким образом, разработанная методика решения сформулированной задачи АКОР, основанная на методе динамического программирования, позволила получить алгоритм оптимального управления в системе с обратной связью при неполном измерении управляемой функции состояния, обеспечивающий минимум среднеквадратичной интегральной ошибки отклонения радиального распределения температурного поля от заданного при минимальном расходе энергии на процесс периодического индукционного нагрева, описываемого уравнением Фурье с нелинейными граничными условиями.

**Третья глава** посвящена разработке проблемно-ориентированных нелинейных численных моделей взаимосвязанных электромагнитных и

температурных полей в процессе индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок. Проводится исследование температурных режимов индукционного нагрева в системах оптимальной стабилизации с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек заготовки, при интегрировании разработанных моделей в контур управления. Анализируются полученные в диссертации результаты, и приводится обоснование их практической применимости при построении замкнутых систем автоматического управления температурными режимами индукционного нагрева в условиях неполного объема информации об управляемом технологическом процессе.

В работе рассматривается базовая математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в процессе индукционного нагрева металла, описываемая следующей системой нелинейных уравнений Максвелла и Фурье:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}; \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \operatorname{div} \mathbf{E} = 0; \quad (21)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}; \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}; \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E};$$

$$c(\Theta)\gamma(\Theta)\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(\Theta) \operatorname{grad} \Theta) - c(\Theta)\gamma(\Theta)\mathbf{V} \operatorname{grad} \Theta - \operatorname{div}[\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}]. \quad (22)$$

Здесь  $\mathbf{E}$ - вектор напряженности электрического поля;  $\mathbf{D}$ - вектор электрической индукции (электрического смещения);  $\mathbf{B}$  - вектор магнитной индукции;  $\mathbf{H}$  - вектор напряженности магнитного поля;  $\mathbf{J}$  - плотность тока проводимости,  $\Theta$  - температурное поле,  $\mathbf{V}$  - вектор скорости перемещения заготовки, где  $\mu_0$ - магнитная постоянная,  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость материала,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость материала. Решение системы (21), (22) целесообразно осуществлять численными методами с использованием современных универсальных и специализированных программных продуктов для разработки цифровых электротепловых моделей процессов.

В диссертации представлен обзор современных методов и средств численного моделирования объектов технологической теплофизики с распределенными параметрами. Наличие большого числа конкурирующих многофункциональных и специализированных программных пакетов, предназначенных для численного моделирования поведения электротепловых полей, показывает их востребованность для анализа и оптимизации электротехнологических процессов, в том числе при разработке, проектировании и исследовании ИТУ. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что широко распространенный многофункциональный мультифизический конечноэлементный пакет прикладных программ ANSYS представляет наибольшие возможности для компьютерного моделирования замкнутых систем управления технологическими ПИНМ.

На первом этапе для исследования разработанного алгоритма в условиях принятых во второй главе упрощений была разработана одномерная численная модель процесса индукционного нагрева с кусочно-постоянными значениями теплофизических параметров и нелинейными граничными

условиями. Модель построена путем конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения объекта (1), которое с учетом (16) и (19), принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \Theta(x,t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 \Theta(x,t)}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \Theta(x,t)}{\partial x} \right) - \frac{\omega^* (\Theta(x_M,t) - \Theta_{mp}) W(x)}{ZW(x_M)}; \quad (23)$$

$$x_0 < x < x_R, 0 < t \leq t_k.$$

Система линейных алгебраических уравнений, полученная после аппроксимации уравнения (23) конечными разностями, была решена методом прогонки в программном пакете MATLAB при следующих исходных данных  $R=0,05$  м,  $\lambda=28,7$  Вт/(м·°С),  $\gamma=7486$  кг/м<sup>3</sup>,  $c=647$  Дж/(кг·°С),  $\mu=1$ ,  $\sigma=8,2 \cdot 10^5$  См/м,  $\sigma_{CB}=5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>,  $\Theta_{cp}=600$ °С,  $\Theta_{mp}=1200$ °С,  $\varepsilon_{cm}=0,7$ ,  $\alpha=10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $Z=0,851$ ,  $\omega^*=0,149$ . Разработанная модель интегрирована в систему управления при реализации найденного в аналитической форме алгоритма оптимального управления (16) с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек нагреваемой заготовки.

Исходя из наложенного ограничения (17) и возможностей технической реализации сигнала обратной связи в замкнутой системе управления с точечным датчиком температуры, в качестве точки измерения была выбрана наиболее приближенная к поверхности заготовки точка  $x_M=0,99R$ , температура в которой пренебрежимо мало отличается от температуры поверхности  $\Theta(R,t)$  нагреваемой заготовки.

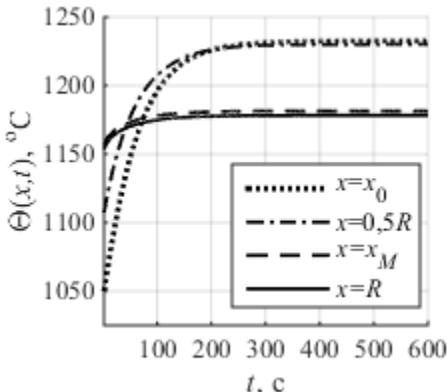


Рисунок 1 - Изменение температуры в различных точках радиального сечения заготовки в оптимальном процессе стабилизации температурного режима

На рисунке 1 представлены результаты расчета температуры в точках  $x=0$ ,  $x=0,5R$ ,  $x=x_M$ ,  $x=R$  в процессе стабилизации температурного режима индукционного нагрева. Анализ представленных данных показывает, что система оптимальной стабилизации при заданном начальном температурном распределении за время  $t=55$  с обеспечивает достижение требуемых температурных кондиций с максимальным абсолютным отклонением от требуемого равномерного распределения  $\Theta_{mp}$  менее 50°С, в момент

времени  $t=71$  с температурный перепад между максимальным и минимальными значениями температуры составляет 30°С, далее процесс стабилизируется с абсолютным отклонением от требуемого температурного распределения, не превышающим 30°С, при этом разность температур на поверхности заготовки  $\Theta(R,t)$  и в точке измерения  $\Theta_M(t)$  не превышает 4°С.

Таким образом, система с обратной связью и интегрированной конечно-разностной моделью управляемого процесса в контуре, реализующая разработанный алгоритм оптимального управления, обеспечивает достижение требуемых температурных кондиций с удовлетворительной точностью и позволяет стабилизировать достигнутый температурный режим в течение требуемого по технологии времени.

Для учета температурных зависимостей теплофизических параметров процесса, сложной геометрии системы «индуктор-металл», неравномерности распределения внутренних источников тепла, нелинейных законов теплообмена с окружающей средой и других усложняющих факторов, соответствующих реальным условиям технической реализации процесса, в пакете прикладных программ ANSYS разработана нелинейная двумерная численная модель.

Алгоритм моделирования процесса индукционного нагрева представляет собой последовательную итерационную процедуру, включающую расчет переходного теплового процесса и гармонический электромагнитный анализ. При моделировании процесс индукционного нагрева разделяется на временные шаги, на каждом из которых происходит последовательное решение электромагнитной и тепловой задач согласно следующим этапам: построение геометрии; задание свойств материалов, с учетом их зависимости от температуры; выбор типа элемента и создание конечно-элементной сетки; задание граничных условий; непосредственное решение соответствующей задачи.

Исследован технологический процесс индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки длиной  $l = 0,55$  м и радиусом  $R = 0,05$  м перед штамповкой. В качестве материала заготовки выбрана конструкционная углеродистая качественная сталь марки С40. Полученные результаты моделирования соответствуют известным физическим закономерностям поведения температурного поля и изменения мощности внутренних источников тепла в процессе индукционного нагрева заготовок из углеродистой стали.

Проведенный сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных свидетельствует об удовлетворительной степени точности и достоверности разработанной модели.

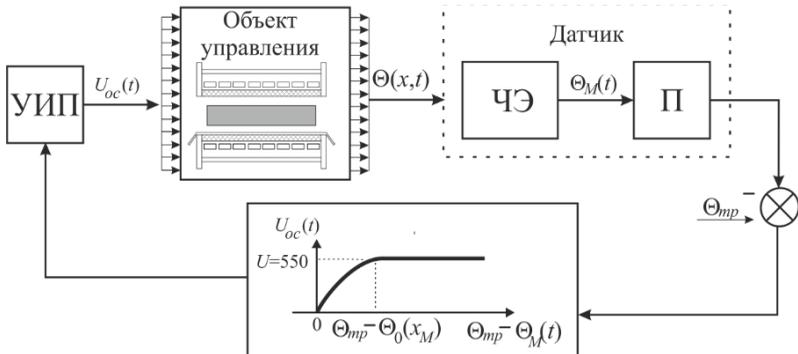
Нелинейная двумерная численная модель интегрирована в систему управления с обратной связью по температуре, измеряемой в одной из точек нагреваемой заготовки, при реализации найденного во второй главе в аналитической форме алгоритма оптимального управления.

При построении замкнутой системы управления ПИНМ необходимо произвести пересчет мощности внутренних источников тепла, определяемой по алгоритму оптимального управления (16), в напряжение источника питания  $U_{oc}^*(\Theta_M, t)$ , которое является управляющим воздействием, реализуемым в ИНУ.

Система управления процессом построена следующим образом: если температура в точке измерения  $\Theta_M(t)$ , меньше чем заранее заданное фиксированное значение  $\Theta_0(x_M, t) = const$ , с которого начинается режим стабилизации, то напряжение индуктора равно номинальному значению  $U$ , иначе значение напряжения определяется согласно выражению (16) с учетом соответствующего коэффициента пересчета. Таким образом, оптимальное управление процессом нагрева в замкнутой системе изменяется по следующему закону:

$$U_{oc}(t) = \begin{cases} U, & \text{при } \Theta_{mp} - \Theta_M(t) > \Theta_{mp} - \Theta_0(x_M, t) \\ U_{oc}^*(\Theta_M, t), & \text{при } \Theta_{mp} - \Theta_M(t) < \Theta_{mp} - \Theta_0(x_M, t) \end{cases} \quad (24)$$

Функциональная схема соответствующей замкнутой системы оптимального управления ПИНМ представлена на рисунке 2.



ЧЭ – чувствительный элемент, П – преобразователь, УИП – управляемый источник питания  
Рисунок 2 – Функциональная схема замкнутой системы оптимального управления ПИНМ

В диссертационной работе получены и проанализированы результаты оптимального управления технологическим процессом индукционного нагрева стальных заготовок, описываемого двумерной численной моделью, в условиях, когда вся доступная информация об управляемой функции состояния, в качестве которой выступает температурное распределение по радиусу или по объему заготовки, исчерпывается значением температуры, измеряемой в одной точке с фиксированной координатой, при  $\Theta_0(x_M, t) = 1150^\circ\text{C}$  и номинальном напряжении индуктора  $U = 550\text{ В}$ .

В первом исследуемом случае датчик измерения температуры расположен в точке на поверхности заготовки в центральном радиальном сечении.

На рисунках 3-5 приведены результаты численного моделирования процессов индукционного нагрева в системе с обратной связью. Из представленных на рис. 3-4 данных следует, что замкнутая система управления ПИНМ за время  $t = 345\text{ с}$  обеспечивает достижение требуемого температурного распределения с максимальным абсолютным отклонением, не превышающим  $50^\circ\text{C}$ . При продолжении нагрева в момент времени  $t = 361\text{ с}$

достигается температурное распределение с максимальным температурным перепадом, равным  $27^{\circ}\text{C}$ , далее процесс стабилизируется около требуемого состояния с максимальным абсолютным отклонением, не превышающим  $30^{\circ}\text{C}$ . На рисунке 5 показан вид оптимального управляющего воздействия в процессе стабилизации температурного режима.

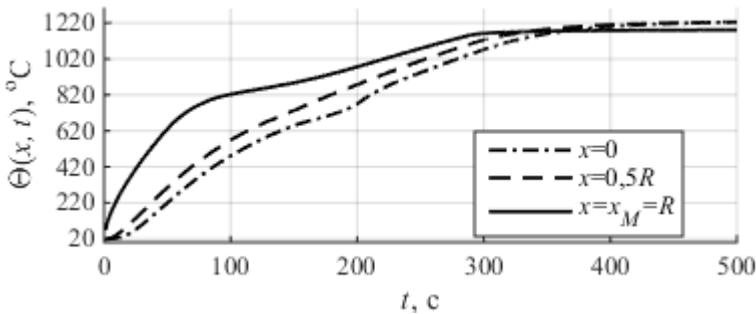


Рисунок 3 – Изменение температуры в различных точках в центральном радиальном сечении заготовки в оптимальном процессе индукционного нагрева

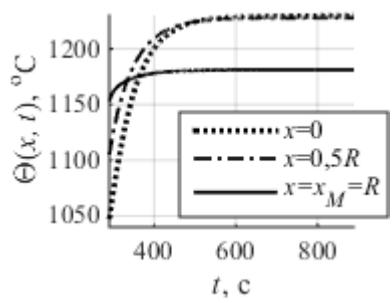


Рисунок 4 - Изменение температуры в различных точках в центральном радиальном сечении заготовки в оптимальном процессе стабилизации

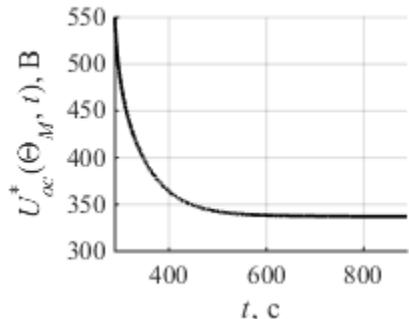


Рисунок 5 – Оптимальное управляющее воздействие в процессе стабилизации температурного режима при измерении температуры в точке на поверхности заготовки в центральном радиальном сечении

Во втором исследуемом случае рассматривается применение найденного алгоритма (16) для оптимального управления технологическим ПИНМ, описываемого двумерной численной моделью, в условиях, когда датчик измерения температуры расположен на торце заготовки. Так как в этом случае измерение технически реализуемо в любой произвольной точке, были получены результаты моделирования процесса индукционного нагрева для шести точек измерения с радиальными координатам  $x=0, 0,2R, \dots R$ . Сравнительный анализ полученных результатов показал, что при измерении температуры в точке с координатой  $x=0,8R$  обеспечивается нагрев с наименьшим абсолютным отклонением температуры в центральном радиальном сечении от заданного значения, а также наименьшее время выхода системы на режим стабилизации температуры, что обеспечивает наибольшую экономию энергетических ресурсов.

Результаты численного моделирования процесса периодического индукционного нагрева в системе с обратной связью по температуре в точке  $x=0,8R$  на торце заготовки продемонстрированы на рисунках 6-9. Рисунок 8 демонстрирует вид оптимального управления напряжением на индукторе в течение процесса оптимальной стабилизации. Из представленных на рисунках 6-7, 9 результатов следует, что замкнутая система управления ПИИМ за время  $t=343$  с обеспечивает достижение требуемого температурного распределения в центральном радиальном сечении с максимальным абсолютным отклонением  $50^{\circ}\text{C}$ . При продолжении нагрева в момент времени  $t=361$  с достигается температурное распределение с максимальным температурным перепадом равным  $30^{\circ}\text{C}$ , далее процесс стабилизируется около требуемого состояния с максимальным абсолютным отклонением, не превышающим  $27^{\circ}\text{C}$ .

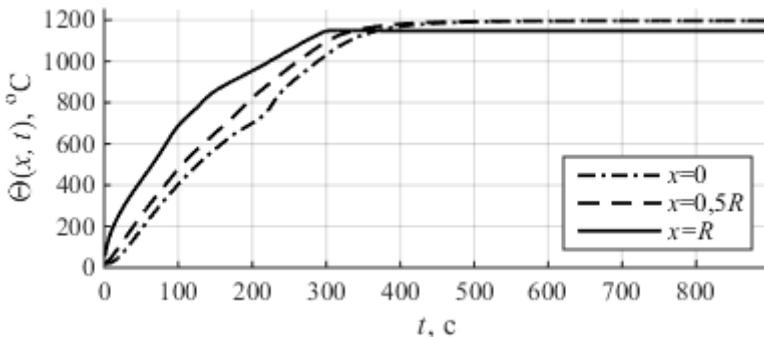


Рисунок 6 – Изменение температуры в оптимальном процессе индукционного нагрева в различных точках на торце заготовки

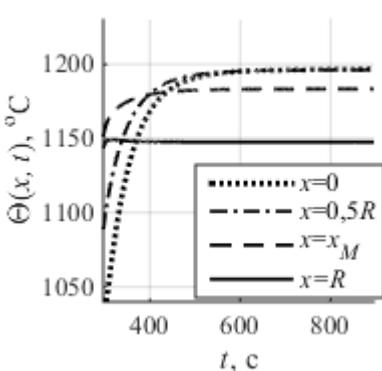


Рисунок 7 - Изменение температуры в различных точках в центральном радиальном сечении заготовки в оптимальном процессе стабилизации

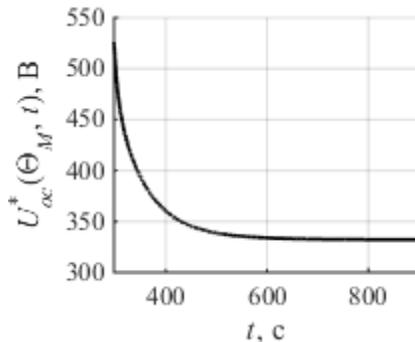


Рисунок 8 - Оптимальное управляющее воздействие в процессе стабилизации температурного режима при измерении температуры в точке на торце заготовки

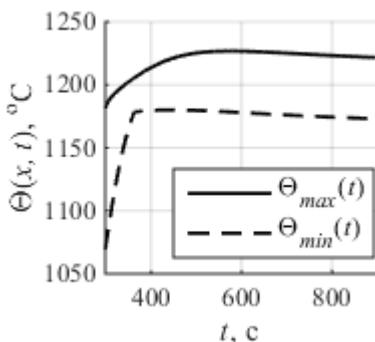


Рисунок 9 - Максимальная  $\Theta_{max}(t)$  и минимальная  $\Theta_{min}(t)$  температуры в центральном радиальном сечении заготовки в процессе оптимальной стабилизации

энергозатрат на 4,4% по сравнению с типовым режимом нагрева, а также повышение точности стабилизации температуры около требуемого значения и снижение энергозатрат от 2,5% до 13% по сравнению со стабилизацией при релейном управлении.

Предложена техническая реализация системы оптимального управления с использованием пирометра LumaSense IGA 320/23 и программируемого логического контроллера FASTWEL I/O. Полученные результаты моделирования ПИНМ в замкнутой системе управления с учетом погрешности измерения и работы фильтра низких частот свидетельствуют о применимости полученных в диссертации результатов в реальных условиях функционирования промышленных технологических линий для обработки металлов давлением с предварительным индукционным нагревом.

**В заключении** перечисляются основные результаты приведенных в диссертации исследований:

1. Разработана методика решения задачи АКОР, сформулированной как задача векторной оптимизации температурных режимов индукционного нагрева с критерием оптимальности в форме линейной свертки типовых показателей качества, представляющей собой взвешенную сумму интегральной квадратичной ошибки регулирования и расхода энергии на процесс управления, в условиях неполного измерения состояния объекта.

2. Получен алгоритм оптимального управления температурным режимом процесса индукционного нагрева в замкнутой системе при измерении температуры в одной фиксированной точке заготовки.

3. Разработаны и верифицированы нелинейные численные модели взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей в процессе индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок в замкнутой системе оптимальной стабилизации температурного режима технологического индукционного нагрева.

4. Разработанный алгоритм оптимальной стабилизации температурных режимов индукционного нагрева в замкнутых системах управления с обратной связью по температуре, измеряемой в одной фиксированной точке

Сравнительный анализ результатов моделирования, полученных для одномерной и двумерной моделей показал удовлетворительное совпадение, что подтверждает возможность применения разработанного алгоритма (16) для управления ПИНМ в условиях неравномерного характера распределения внутренних источников тепла в заготовке и теплопотерь с ее торцов.

Проведена оценка эффективности работы систем оптимального управления на основе предлагаемого алгоритма, которая показала снижение

заготовки исследован с использованием численных нелинейных моделей взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей.

5. Проведенный анализ показал, что полученные в диссертации результаты позволяют снизить энергозатраты на 4,4% по сравнению с типовым режимом нагрева, а также повысить точность стабилизации температуры при сокращении энергопотребления на 2,5-13% по сравнению со стабилизацией при релейном управлении.

6. Обоснована практическая применимость и представлены дальнейшие перспективы развития полученных результатов при построении автоматических замкнутых систем управления температурными режимами технологических процессов индукционного нагрева.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в научных изданиях, индексируемых в базе Scopus**

1. Artur, M.Kh. Synthesis of Feed-Back System of Optimal Control for Numerical Model of Induction Heating Process of Steel Cylindrical Billets [Текст] / M.Kh. Artur, Y.E. Pleshivtseva // International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (9-16 сентября 2018 г., г. Сочи), (0,375 п.л.);

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ**

2. Лапицкая (Артур), М.Х. Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева массивного тела [Текст] / М.Х. Лапицкая (Артур) // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ», № 1 (29) 2011 г. С. 220 – 226. (0,43 п.л.);

3. Лапицкая (Артур), М.Х. Аналитическое конструирование оптимального регулятора в системе управления процессом индукционного нагрева цилиндрических заготовок [Текст] / М.Х. Лапицкая (Артур) // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Серия «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ», № 4 (32) 2011 г., с. 165-171 (0,43 п.л.);

4. Артур, М.Х. Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки при неполном измерении состояния [Текст] / М.Х. Артур // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 3 (55). С. 7-15 (0,56 п.л.);

5. Артур, М.Х. Синтез замкнутой системы оптимального управления численной моделью процесса индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок [Текст] / М.Х. Артур, Ю.Э. Плешивцева // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2018. № 1 (197). с. 29-36 (0,5 / 0,25 п.л.);

### **Публикации в других изданиях**

6. Лапицкая (Артур), М.Х. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов для объектов с распределенными параметрами параболического типа [Текст] / М.Х. Лапицкая (Артур) // XIY Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х. Т.2. – Томск:

- Изд-во Томского политехнического университета, 2008. с 326-327 (0,125 п.л.);
7. Лапицкая (Артур), М.Х. Синтез алгоритмов оптимального управления тепловым линейным объектом при неполном измерении состояния [Текст] / М.Х. Лапицкая (Артур) // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010): Материалы Международной научно-технической конференции. 17-21 мая 2010 г. Самар. гос. техн. ун-т., - Самара, 2010 г. с. 31-36 (0,17 п.л.);
8. Лапицкая (Артур), М.Х. Синтез алгоритмов оптимального управления процессом нагрева массивного тела при полном измерении состояния [Текст] / Лапицкая (Артур) М.Х. // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч 2, «Моделирование и оптимизация динамических систем с распределенными параметрами». – Самара: СамГТУ, 2010. с.160-163 (0,09 п.л.);
9. Лапицкая (Артур), М.Х. Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева цилиндрической заготовки при неполном измерении состояния [Текст] / Лапицкая (Артур) М.Х., Плешивцева Ю.Э. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIV Международной конференции (19-22 июня 2012г. Самара, Россия)/ Под. ред.: акад. Е.А. Федорова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. – Самара: Самарский научный центр РАН, с. 87-92 (0,3 / 0,15 п.л.);
10. Лапицкая (Артур), М.Х. Моделирование процесса индукционного нагрева цилиндрической заготовки в замкнутой системе управления с измерителем состояния [Текст] / М.Х. Лапицкая (Артур) // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции (25-28 июня 2013 г. Самара, Россия) / Под ред. акад. Е.А. Федосеева, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. – с. 78-83 (0,3 п.л.);
11. Лапицкая (Артур), М.Х. Численное моделирование температурного поля стальной цилиндрической заготовки в процессе периодического индукционного нагрева [Текст] / Лапицкая (Артур) М.Х. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции (30 июня 03 июля 2014 г. Самара, Россия) / Под ред. акад. Е.А. Федосеева, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – с. 81-85 (0,25 п.л.);

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.07  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 4 от 21.09.2018 г.)  
Заказ № \_\_\_\_\_. Формат 60x84 1/16. Тираж 120 экз.  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной полиграфии  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244