

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ПОПОВ Антон Валерьевич



**ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В ПРОЦЕССЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ
ЗАКАЛКИ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Плешивцева Юлия Эдгаровна

Самара – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Оглавление.....	2
Введение	4
1 Проблема оптимального проектирования индукционных нагревателей для поверхностной индукционной закалки.....	18
1.1 Современные промышленные технологии упрочнения стали.....	18
1.1.1 Типовые промышленные технологии термической обработки стали.....	18
1.1.2 Виды и способы поверхностной закалки стали.....	23
1.1.3 Технология поверхностной индукционной закалки	25
1.2 Общая постановка задачи оптимизации индукционной нагревательной установки как объекта с распределенными параметрами	31
1.3 Современные методы оптимизации систем с распределенными параметрами ...	38
1.4 Содержательная постановка задачи диссертационного исследования и степень разработанности темы	46
1.5 Выводы по первой главе	51
2 Постановка и решение задач оптимального проектирования и управления на основе альтернансного метода	54
2.1 Постановка задач оптимального проектирования и управления процессом поверхностной индукционной закалки.....	54
2.1.1 Постановка задачи оптимального проектирования	54
2.1.2 Постановка и параметризация задачи оптимального по быстродействию управления.....	58
2.2 Методика решения задач параметрической оптимизации конструкции индуктора и алгоритмов управления процессом поверхностной индукционной закалки.....	63
2.2.1 Методика решения задачи оптимального проектирования.....	64
2.2.2 Алгоритм решения задачи оптимального по быстродействию управления при ограничении на максимальную температуру заготовки.....	74
2.3 Выводы по второй главе	80

3 Построение автоматизированной процедуры оптимизации на базе численных моделей	82
3.1 Современные программные средства моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей	82
3.2 Двумерная нелинейная модель стадии нагрева	85
3.2.1 Построение численных моделей в программном пакете Altair FLUX.....	86
3.2.2 Валидация разработанной численной FLUX модели.....	98
3.3 Интеграция численной FLUX модели в автоматизированную процедуру параметрической оптимизации	101
3.4 Выводы по третьей главе	106
4 Численное решение задач оптимизации процесса индукционной закалки на базе альтернансного метода	107
4.1 Решение задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностной индукционной закалки стальных заготовок.....	107
4.2 Сравнение результатов решения задачи оптимального проектирования с решением, полученным с помощью генетических алгоритмов.....	112
4.3 Решение задачи оптимального проектирования в условиях интервальной неопределенности параметров процесса	116
4.4 Решение задачи оптимального управления с учетом ограничения на максимально допустимую температуру заготовки	120
4.5 Техническая реализация оптимального алгоритма управления с учетом ограничения на максимальную температуру заготовки	124
4.6 Выводы по четвертой главе	129
Заключение	131
Список литературы	134
Приложение А. Сравнение функциональных возможностей программных пакетов для конечно-элементного анализа	145
Приложение Б. Справка об использовании результатов кандидатской диссертации	147
Приложение В. Акты об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Индукционная закалка в настоящее время представляет одну из наиболее широко используемых в промышленности технологий термической обработки сталей, чугуна и других ферромагнитных материалов. Применение индукционной закалки обусловлено необходимостью получения определенных изменений в микроструктуре обрабатываемого материала для его упрочнения, повышения сопротивления изнашиванию или усталостному разрушению, а также для формирования заданной амплитуды или распределения растягивающих термонапряжений. В некоторых случаях изменения в структуре металла требуется получить по всему объему обрабатываемой детали, для чего применяется сквозная индукционная закалка с глубиной закаливаемого слоя, равной геометрическим размерам заготовки. В ситуациях, когда необходимо упрочнить только поверхностный слой изделия без изменения свойств сердцевины, применяется поверхностная индукционная закалка. Наиболее типичным примером является поверхностная закалка коленчатых и распределительных валов двигателей, шестерней или колец подшипников [1].

Процесс поверхностной индукционной закалки в общем случае состоит из трех стадий: интенсивного нагрева закаливаемого слоя обрабатываемого изделия выше температуры Кюри в переменном магнитном поле индуктора высокой частоты, выдерживания в течение времени, необходимого для формирования однородной аустенитной структуры, и резкого охлаждения нагретого слоя ниже температуры, при которой начинается процесс мартенситного преобразования.

Эффективность индукционной закалки обусловлена рядом существенных преимуществ по сравнению с другими способами термической обработки. К ним относятся: бесконтактная передача энергии от источника к нагреваемой детали, возможность локального нагрева заготовки, изменяемая глубина закаливаемого слоя, зависящая от частоты питающего тока, возможность управления температурным полем в процессе нагрева и охлаждения, высокая скорость нагрева, обусловленная высокой мощностью внутренних источников тепла, нагрев детали практически без окисления и обезуглероживания ввиду малого времени нагрева, пониженное энергопотребление из-

за отсутствия длительных периодов простоя или холостой работы оборудования и др. [1-5].

Первой операцией упрочняющей термической обработки железоуглеродистых сталей, является нагрев, обеспечивающий образование аустенита. Корреляция между состоянием аустенита и формирующимися после закалки свойствами стали является базовой зависимостью, лежащей в основе разработки режимов термической обработки, целью которых является достижение требуемых свойств упрочненного слоя изделия. Развитие и углубление сведений о процессах и условиях образования аустенита при нагреве и последующем его превращении в мартенсит при закалке связано с внедрением в практику термической обработки операций скоростного индукционного нагрева, что нашло отражение в работах [6, 7].

Несмотря на то, что создание конструктивных методов и техники решения задач оптимального проектирования и управления режимами нагрева в процессе индукционной закалки для конкретных производственных ситуаций вынужденно абстрагируется от точного подробного учета комплекса сложных физических явлений фазообразования при превращениях исходных структур в высокотемпературную фазу, которую представляет собой аустенит, понимание и оценка основных аспектов аустенитизации должны учитываться при постановке задачи отыскания технически реализуемых оптимальных конструктивных решений и алгоритмов управления температурными режимами.

Кинетика образования аустенита подчиняется основным закономерностям фазовых превращений, протекающих при нагреве [8]. Большинство гипотез зарождения аустенита основано на представлениях о флуктуационном характере этого явления, формально рассматривающих два крайних случая. В первом предполагается, что базой для зарождения аустенита являются флуктуации концентрации, приводящие к возникновению участков критического размера, способных при малом перегреве выше точки $A_1=723^\circ\text{C}$ претерпеть полиморфное превращение и стать устойчивыми центрами роста аустенитных зерен. Другое предположение состоит в том, что при зарождении аустенита первичны не флуктуации концентрации, а флуктуационная перестройка кристаллической решетки: внутри исходной фазы феррита участки с γ -решеткой аустенита флуктуационно возникают и исчезают, а на границе с цементитом при

температурах выше $A_1=723^\circ\text{C}$ эти участки обогащаются углеродом из карбида и, достигая критического размера, становятся устойчивыми центрами роста аустенита.

Первично образовавшийся аустенит неоднороден по концентрации углерода, поэтому для выравнивания состава аустенита после окончания фазового превращения требуется время, в течение которого диффузионным способом осуществляется его гомогенизация. Таким образом, кинетика образования аустенита при нагреве включает несколько этапов, время окончания которых уменьшается с ростом температуры, при этом рост аустенита ускоряется.

Необходимо учитывать, что индукционный нагрев обеспечивает повышенные, по сравнению с другими видами печного нагрева, скорости роста температуры поверхностных слоев обрабатываемого изделия. В результате, согласно схемам изотермического образования аустенита, температуры окончания образования аустенита и его гомогенизации повышаются [8].

В углеродистых сталях образование и гомогенизация аустенита протекают достаточно быстро (длительность всех процессов аустенитизации не превышает нескольких минут). В легированных сталях гомогенизация осложнена неравномерностью распределения легирующих элементов в низкотемпературных исходных фазах феррита и карбида, в результате чего по окончании превращения химический состав аустенита существенно не однороден как по концентрации легирующих элементов, так и по концентрации углерода.

Учет особенностей образования аустенита играет принципиальную роль на этапе обоснования требований и конечных результатов при формировании критериев и ограничений на управляющие воздействия для рассматриваемых в диссертационной работе постановок задач оптимального проектирования и управления режимами индукционного нагрева.

Все вышесказанное подтверждает необходимость обеспечения при индукционном нагреве равномерного распределения температуры в поверхностном слое изделия для исключения в дальнейшем на стадии закалочного охлаждения структурной неоднородности и разброса прочностных характеристик по глубине слоя. Одновременно достигается снижение вероятности возникновения критического уровня закалочных напряжений, способных привести к недопустимым дефектам типа трещин.

Для обеспечения требуемого температурного профиля в упрочняемом слое оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревательных установок, изменение режимов функционирования которых также не приводит к возможности достижения заданных температурных кондиций. В этой связи особенно важной становится задача оптимизации конструктивных характеристик индуктора и его режимных параметров [6-7]. Поскольку процесс закалки реализуется при высокой скорости нагрева до температур, превышающих точку Кюри, существенной проблемой также становится возможный перегрев поверхности заготовки, недопустимый по технологии данного процесса [1-3].

С учетом постоянно растущих технологических требований к качеству производимой продукции и всеобщей тенденции к сокращению затрат на ее изготовление, все вышесказанное обуславливает необходимость совершенствования и модернизации производственных процессов. В связи с этим актуальной становится задача повышения эффективности функционирования производственного оборудования за счет оптимизации конструктивных характеристик и режимов работы применяемых в рассматриваемом технологическом процессе индукционных нагревательных установок и систем по заранее выбранным критериям качества. Задача может быть решена с помощью современных методов теории оптимального управления системами с распределенными параметрами.

Стадия нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, являющаяся объектом исследования диссертационной работы, в общем случае описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений для электромагнитного и теплового полей, точное аналитическое решение которой получить невозможно, поэтому особую важность приобретает задача построения численной проблемно-ориентированной модели рассматриваемого процесса и интегрирования полученной модели в оптимизационную процедуру.

Все перечисленное обуславливает актуальность задач оптимального проектирования и управления режимами работы индукционной установки на стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, решению которых посвящено диссертационное исследование.

Степень её разработанности

Проведенный анализ результатов исследований в области оптимизации энерготехнологических установок и систем для индукционного нагрева и термообработки металлических изделий широкого профиля свидетельствует о высоком потенциале применения методов оптимизации систем с распределенными параметрами для повышения технико-экономических показателей нагревательных установок и совершенствования качества технологических процессов. Однако, несмотря на имеющийся существенный задел, следует отметить, что проблема оптимального проектирования и управления режимами работы индукторов, применяемых в процессах поверхностной закалки, изучена недостаточно, что подчеркивает актуальность решаемых в диссертационной работе задач.

Целью диссертационной работы является оптимизация конструктивных характеристик и режимов функционирования индукционных нагревателей для обеспечения высокого качества процесса закалки стальных цилиндрических заготовок, зависящего от точности нагрева поверхностного слоя упрочняемой детали при отсутствии локальных перегревов по ее объему.

Основные задачи диссертационного исследования

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

1. Разработка проблемно-ориентированной численной нелинейной модели индукционной нагревательной системы в программном пакете Altair FLUX для анализа взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок.
2. Параметрический анализ и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторной индукционной установке, для валидации разработанной нелинейной двумерной численной модели.
3. Постановка задачи оптимального проектирования индуктора, реализующего стадию нагрева поверхностной индукционной закалки стальных заготовок, и разработка методики ее решения с использованием численной нелинейной модели индукционной нагревательной системы в условиях наличия полной информации и при интервальной неопределенности параметров процесса.

4. Формулировка и решение на основе альтернативного метода нелинейной задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева в процессе поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру поверхности заготовки.

5. Построение автоматизированной процедуры оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки в пакете прикладных программ Matlab с интеграцией разработанной численной двумерной FLUX модели процесса индукционного нагрева.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы численного и компьютерного моделирования, методы теории оптимального управления объектами и системами с распределенными параметрами, теории теплопроводности и электромагнетизма, экспериментальные методы исследования.

Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. На базе альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами разработана и апробирована новая методика решения задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностной закалки стальных заготовок, которая в отличие от известных позволяет обеспечить максимально достижимую точность нагрева поверхностного слоя упрочняемой детали, как в условиях наличия полной информации, так и при интервальной неопределенности параметров, характеризующих стадию индукционного нагрева.

2. На базе общей методики альтернативного метода разработан алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления режимами нагрева в процессе поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру поверхности заготовки, который, в отличие от известных, позволяет получить максимальную скорость нагрева поверхностного слоя при отсутствии локальных перегревов по объему упрочняемой детали.

3. Разработана специализированная автоматизированная процедура параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки в пакете прикладных программ Matlab с интеграцией разработанной численной двумерной FLUX модели процесса индукционного нагрева, позволяющая экономить вычислительные ресурсы и существенно снижать время расчетов по сравнению с известными численными методами оптимизации.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика решения задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностной индукционной закалки стальных заготовок в условиях наличия полной информации и при интервальной неопределенности параметров, характеризующих стадию нагрева процесса закалки.

2. Алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления процессом поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру заготовки в процессе нагрева.

3. Специализированная автоматизированная процедура параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки, реализованная в среде MATLAB с интеграцией численной двумерной нелинейной модели процесса нагрева, разработанной в пакете Altair FLUX.

Практическая значимость работы

Разработанные в диссертации многомерные проблемно-ориентированные численные модели, методики оптимального проектирования и алгоритм решения задачи оптимального управления, а также автоматизированная процедура оптимизации проектных решений и алгоритмов управления могут быть использованы при решении задач оптимизации конструкций нагревательных установок и режимов их работы в электротехнологических процессах различного назначения.

Степень достоверности результатов

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе научных результатов и выводов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, методов численного моделирования и теории управления системами с распределенными параметрами.

Справедливость выводов относительно полученных в работе проектных решений и алгоритмов управления подтверждается результатами компьютерного моделирования, физическими экспериментами, проведенными на лабораторной установке, и использованием результатов диссертационной работы при выполнении научно-исследовательских работ, поддержанных РФФИ, Минобрнауки РФ и Германской службой академических обменов DAAD.

Реализация результатов исследований

Полученные в работе теоретические положения и практические результаты были использованы:

- при выполнении НИР «Численное моделирование и многокритериальная оптимизация нелинейных объектов технологической теплофизики с распределенными параметрами» в рамках базовой части госзадания №2014/199 (2014-2016 гг.);

- при выполнении НИР по проектам Российского Фонда Фундаментальных Исследований «Разработка научно-технических основ интегрированного оптимального проектирования и многокритериального управления электротермическими установками для нагрева металлических полуфабрикатов перед последующей обработкой давлением» (№16-08-00945) (2016-2018 гг.) и «Оптимальное проектирование и энергоэффективное управление взаимосвязанными электротепловыми полями и термонапряженными состояниями в технологических системах индукционной закалки металлических изделий сложной геометрической формы» (№19-08-00232) (2019-2021 гг.);

- при выполнении НИР «Оптимизация по критериям ресурсной ценности, энергосбережения и экологической безопасности организационно-технической системы утилизации отходов нефтегазового комплекса» в рамках проектной части госзадания №520/17 (2017-2019 гг.);

- при выполнении НИР в рамках государственного задания №0778-2020-0005 (2020-2023 гг.);

- при выполнении совместных научных исследований СамГТУ и Института Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия) по темам: «Многокритериальная оптимизация процессов индукционного нагрева» (2016 г.), «Решение задачи оптимального проектирования индуктора на основе автоматической процедуры оптимизации» (2018 г.), «Моделирование и оптимизация процессов индукционного нагрева на базе численных моделей» (2019 г.) в рамках стипендиальных программ «Леонарда Эйлера» Германской службы академических обменов DAAD и ERASMUS+.

Результаты диссертационного исследования использованы при разработке и проектировании систем автоматического управления процессами индукционного нагрева цилиндрических слитков в АО «Арконик СМЗ», а также в учебном процессе при подготовке в ФГБОУ ВО «СамГТУ» 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».

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: XXIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (2016 г., г. Самара), XXX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (2018 г., г. Санкт-Петербург), XIX и XXI Международных конференциях «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (2017 г., 2019 г., Самара), 44-ой Ежегодной Международной научной конференции «Промышленная электроника» (IECON-18) (2018 г., г. Вашингтон, США), Международной конференции по нагреву электромагнитными источниками «Heating by Electromagnetic sources HES-19» (2019 г., г. Падуя, Италия).

Работа по теме диссертационного исследования была отмечена дипломом Министерства образования и науки Самарской области в рамках областного конкурса «Молодой ученый» в номинации «Аспирант» (Самара, 2017 г.) и премией молодым ученым и конструкторам, работающим в Самарской области (Самара, 2020 г.).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 4 – в журналах, индексируемых зарубежными базами Scopus и Web of Science, 5 – в трудах конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения, изложенных на 149 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 117 наименований и 3 приложения.

Краткое содержание работы

В **первой главе** рассмотрены типовые промышленные технологии термической обработки стали. Приведена классификация видов термической обработки металлов, подробно описаны способы поверхностного упрочнения стали.

Изложены физические основы технологии поверхностной индукционной закалки, включающей стадию нагрева до температуры закалки, которая обычно на 20-30°C превышает критическую температуру образования аустенита, и стадию охлаждения до температуры мартенситного превращения. Показано, что основной целью поверхностной закалки является получение однородной мартенситной структуры и отсутствие разброса прочностных характеристик в упрочняемом слое равномерной глубины, что зависит от равномерности нагрева границы закаливаемого слоя при отсутствии локальных перегревов по ее объему.

Сделан вывод о том, что для обеспечения высокого качества процесса закалки, снижающего или исключаящего вероятность возникновения критического уровня закалочных напряжений, способных привести к недопустимым дефектам типа трещин, оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревательных, изменение режимов функционирования которых также не приводит к возможности достижения заданных температурных кондиций. Этим обстоятельством обусловлена необходимость решения проблемы оптимизации конструктивных характеристик индуктора и его режимных параметров. Показано также, что из-за высокой скорости реализации процесса нагрева существенной проблемой становится возможный перегрев поверхности заготовки, недопустимый по технологии данного процесса, что приводит к

необходимости учета соответствующих фазовых ограничений при решении оптимизационных задач.

В общем виде сформулирована задача оптимизации индукционной нагревательной установки как объекта с распределенными параметрами (ОРП). Представлена базовая математическая модель пространственно-временного распределения температуры, как управляемой функции состояния ОРП, приведены типовые критерии оптимальности, описаны виды управляющих и возмущающих воздействий, а также представлены основные фазовые ограничения.

Приведен обзор современных методов оптимизации систем с распределенными параметрами. Показано, что задачи программного оптимального управления могут быть решены либо с помощью аналитических методов, преимущественно связанных с непосредственным применением принципов максимума Понтрягина и метода моментов, либо посредством численных методов, которые могут быть разделены на две большие группы по способу дискретизации уравнений объекта. Отмечается, что задачи оптимального проектирования индукционных нагревательных установок сводятся к поиску конечного числа параметров, т.е. оказываются параметризованными, и представляют собой задачи полубесконечной оптимизации, при решении которых чаще всего используются численные методы. Указаны основные преимущества рассмотренных методов и недостатки, связанные с их использованием при решении задач оптимизации ОРП.

Описан альтернативный метод параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами, и обосновано его дальнейшее использование при решении сформулированных задач оптимального управления и проектирования.

Приводится содержательная постановка задачи диссертационного исследования, которая сводится к поиску оптимальной конструкции и режимов работы индукционной установки для поверхностной закалки стальных цилиндрических заготовок как при наличии полной информации об исследуемом объекте, так и в условиях интервальной неопределенности основных его характеристик.

Во второй главе рассматривается постановка задач оптимального проектирования двух-виткового индуктора для поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок в условиях полной информации об объекте и при наличии интервальной неопределенности характеристик стадии нагрева процесса

закалки. Приведена математическая модель исследуемого процесса, как объекта с распределенными параметрами, критерий оптимальности, вектор неизвестных оптимизируемых параметров и накладываемые на них ограничения, заданы диапазоны изменения значений не полностью определенных параметров, к которым относятся начальная температура заготовки и обобщенный коэффициент теплообмена. Отмечено, что рассматриваемые задачи представляют собой задачи полубесконечной оптимизации, которые могут быть решены с помощью альтернансного метода.

Сформулирована задача оптимального по быстродействию управления стадией нагрева поверхностной закалки при наличии фазового ограничения на максимальную температуру поверхности заготовки. Приводится параметризация рассматриваемой задачи и ее редукция к задаче математического программирования.

Предлагается методика решения рассматриваемых задач оптимального проектирования индукционной установки на базе альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами, которая обеспечивает максимально достижимую точность нагрева поверхностного слоя упрочняемой детали, как в условиях наличия полной информации, так и при интервальной неопределенности параметров, характеризующих стадию индукционного нагрева. Данная методика позволяет свести решение сформулированных задач оптимизации конструкции индуктора к решению систем трансцендентных уравнений, замкнутых относительно всех неизвестных параметров исследуемого процесса. Отмечается, что температуры в приведенных системах уравнений находятся в результате численного решения систем уравнений Максвелла и Фурье для взаимосвязанных электромагнитного и теплового полей, описывающих исследуемый процесс индукционного нагрева.

Предложен новый алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева в процессе поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру поверхности заготовки, который обеспечивает максимальную скорость нагрева поверхностного слоя без локальных перегревов по объему упрочняемой детали. Согласно данному алгоритму оптимальная программа изменения управляющего воздействия для рассматриваемой задачи представляет собой интервал нагрева с максимально допустимым значением управления, по окончании которого максимальная

температура заготовки достигает своего предельно допустимого значения, и особый участок движения по этому ограничению, который может быть аппроксимирован с помощью кусочно-постоянной функции времени. Аппроксимирующая функция, в свою очередь, находится с помощью итерационной процедуры, на каждом шаге которой устанавливается значение управляющего воздействия, обеспечивающего равенство максимальной температуры детали заданному допустимому значению.

В третьей главе приведен подробный анализ современных средств моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, на основе которого для моделирования стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, являющейся предметом диссертационного исследования, выбран программный пакет Altair FLUX.

Рассматривается алгоритм построения численной проблемно-ориентированной параметризованной модели в конечно-элементном программном пакете Altair FLUX, который включает создание геометрии системы, задание физических параметров и генерацию конечно-элементной сетки в препроцессоре, расчет разработанной модели в процессоре и обработку полученных результатов в постпроцессоре. Приведенный алгоритм используется при разработке параметризованной двумерной численной модели рассматриваемой в диссертационной работе стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки. Проводится валидация разработанной модели путем сравнения с результатами эксперимента на лабораторной нагревательной установке, спроектированной в Институте Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

Приведена общая схема автоматизированной процедуры оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для процесса поверхностного упрочнения стальных заготовок. Показано, что существует два возможных варианта реализации представленной процедуры оптимизации, основанных на совместном использовании пакета Altair FLUX и среды программирования Python или программного комплекса MATLAB. Проведен анализ основных достоинств и недостатков приведенных способов реализации автоматизированной процедуры оптимизации, на основе которого для решения сформулированных в диссертационном исследовании задач была выбрана процедура, разработанная в пакете MATLAB с

интегрированной численной двумерной нелинейной моделью процесса индукционного нагрева, разработанной в пакете Altair FLUX.

В четвертой главе приведены результаты численного решения задачи оптимального проектирования нагревателя для стадии нагрева процесса поверхностной закалки стальных цилиндрических заготовок, полученные с помощью разработанной автоматизированной процедуры оптимизации в условиях полной информации об объекте. Проведено сравнение полученных результатов с решениями, найденными с помощью методов AGDEMO и M-NSGA, а также с результатами нагрева в индукторе типовой конструкции.

Представлены и проанализированы результаты численного решения задачи оптимизации конструкции нагревательной установки в условиях интервальной неопределенности коэффициента теплообмена излучением и начальной температуры обрабатываемой заготовки, полученные при использовании предложенной автоматизированной процедуры оптимизации.

Найденные конструктивные и электрические параметры индукционной установки используются при численном решении задачи оптимального управления с учетом дополнительного фазового ограничения на максимальную температуру изделия. Анализ приведенных результирующих температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя и на поверхности изделия показывает, что при применении оптимальной программы изменения во времени управляющего воздействия по току источника питания максимальная температура детали не превышает заданного допустимого значения в течение всей рассматриваемой стадии нагрева.

Предлагается вариант технической реализации полученного алгоритма оптимального по быстродействию управления в задаче с ограничением на максимальную температуру заготовки, осуществляемой на совместного использования программной среды Codesys и пакетов Altair FLUX и MATLAB.

1 ПРОБЛЕМА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

1.1 Современные промышленные технологии упрочнения стали

1.1.1 Типовые промышленные технологии термической обработки стали

В настоящее время в промышленности широко применяются технологические процессы термической обработки стальных полуфабрикатов для придания готовому изделию требуемых эксплуатационных свойств. Выбор того или иного вида термообработки обуславливается необходимостью получения конкретных изменений во внутреннем строении и микроструктуре обрабатываемого металла.

Согласно общей классификации по А.А. Бочвару, основанной на подобии фазовых и структурных превращений, все виды термической обработки металлических сплавов любого состава могут быть подразделены на пять групп [3, с. 193].

К первой группе относятся процессы рекристаллизационного отжига или отжига первого рода. Эти процессы заключаются в устранении последствий пластической деформации, или так называемого наклепа, с помощью последующего нагрева.

Во вторую группу входят процессы, представляющие собой предварительный нагрев выше критических температур с последующим медленным охлаждением для получения структуры, максимально близкой к равновесной. В результате применения данных технологических процессов наблюдается увеличение пластичности и понижение прочности обрабатываемых сплавов. Все процессы, относящиеся ко второй группе в рамках данной классификации, называются отжигом второго рода или фазовой перекристаллизацией.

Третья группа носит общее название процессов закалки. Процессы этой группы предполагают нагрев выше критических точек с последующим резким, в отличие от процессов второй группы, охлаждением. При закалке некоторых видов аустенитных сталей или сплавов на основе алюминия и никеля аустенитная структура, получившаяся после первой стадии нагрева, сохраняется и после охлаждения до комнатных температур. Такой процесс носит название истинной закалки. При закалке стали и сплавов на основе меди и титана после скоростного охлаждения наблюдается фазовое превращение однородного твердого раствора (аустенита) в неравновесную структуру мартенситного типа.

Процессы четвертой группы заключаются в нагреве закаленного сплава для уменьшения степени неравновесности. При этом нагревание стали, прошедшей закалку, ведет к отпуску, а нагревание сплава после истинной закалки – к старению.

Пятую группу видов термической обработки сплавов составляют процессы химико-термической обработки, которые заключаются в диффузионном насыщении поверхности обрабатываемого изделия различными элементами.

Как уже было отмечено ранее, процессы термической обработки металла применяются для получения определенных свойств обрабатываемых деталей. Поэтому в качестве другого признака классификации видов термообработки может использоваться характер изменения таких свойств. По подобной классификации все процессы тепловой обработки металлов подразделяются на четыре группы [3, с.194-195].

Первая группа процессов предполагает повышение прочности обрабатываемого изделия во всем его объеме. К ним относится закалка с последующим отпуском или закалка с последующим старением.

Ко второй группе относятся процессы, ориентированные на поверхностное упрочнение деталей с целью повышения их износостойчивости и предела выносливости. К таким процессам относятся поверхностная закалка и некоторые процессы химико-термической обработки.

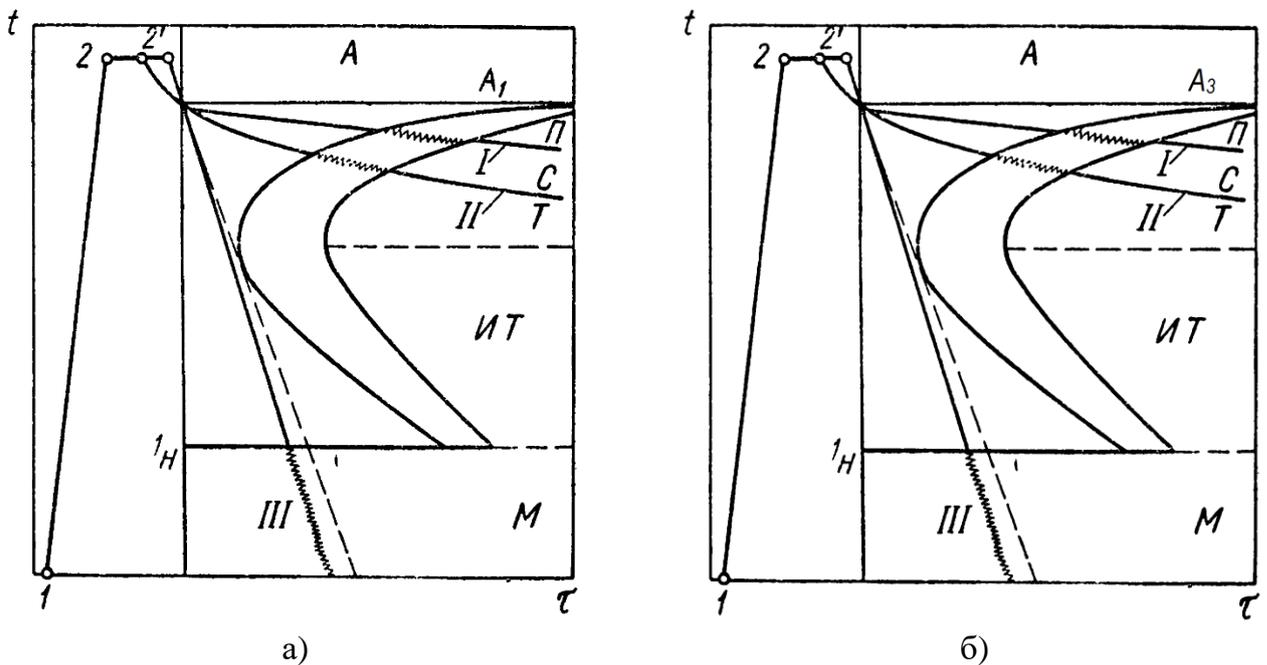
Третья группа видов термической обработки представляет собой процессы, основной задачей которых является общее смягчение обрабатываемых полуфабрикатов, снятие внутренних напряжений, повышение пластичности и ударной вязкости. В качестве примеров таких видов термообработки выступают процессы отжига, нормализации и отпуска.

Процессы четвертой группы представляют технологию термической обработки, которая придает поверхностным слоям обрабатываемых деталей особые физико-химические свойства и повышает стойкость изделий к коррозии, растворению в агрессивных средах, окислению и испарению при высоких температурах. К подобным процессам относятся антикоррозионное азотирование, силицирование, алитирование и т.д. [2,3].

Типовые процессы тепловой обработки стали, к которым относятся отжиг, нормализация, отпуск и закалка, в общем случае могут быть описаны с помощью

наложения кривых охлаждения либо на диаграмму изотермического превращения, либо на термокинетическую диаграмму превращения переохлажденного аустенита.

Первый этап для всех рассматриваемых процессов представляет собой нагрев выше критических температур A_1 - A_3 для получения однородной структуры аустенита (рис. 1.1, участок 1-2). После этого нагретый металл проходит стадию выдержки для выравнивания температуры и завершения образования аустенитной структуры (участок 2-2'), и охлаждения до комнатных температур. При этом последний этап охлаждения может протекать с различной скоростью, которая и определяет строение и свойства стали по окончании процесса [3, с. 195].



а – для эвтектоидной и заэвтектоидной стали; б – для доэвтектоидной стали
 А-аустенит; П-перлит; С-сорбит; Т-троостит; ИТ-игольчатый троостит; М-мартенсит
 Рисунок 1.1 – Схема термических режимов отжига, нормализации и закалки стали

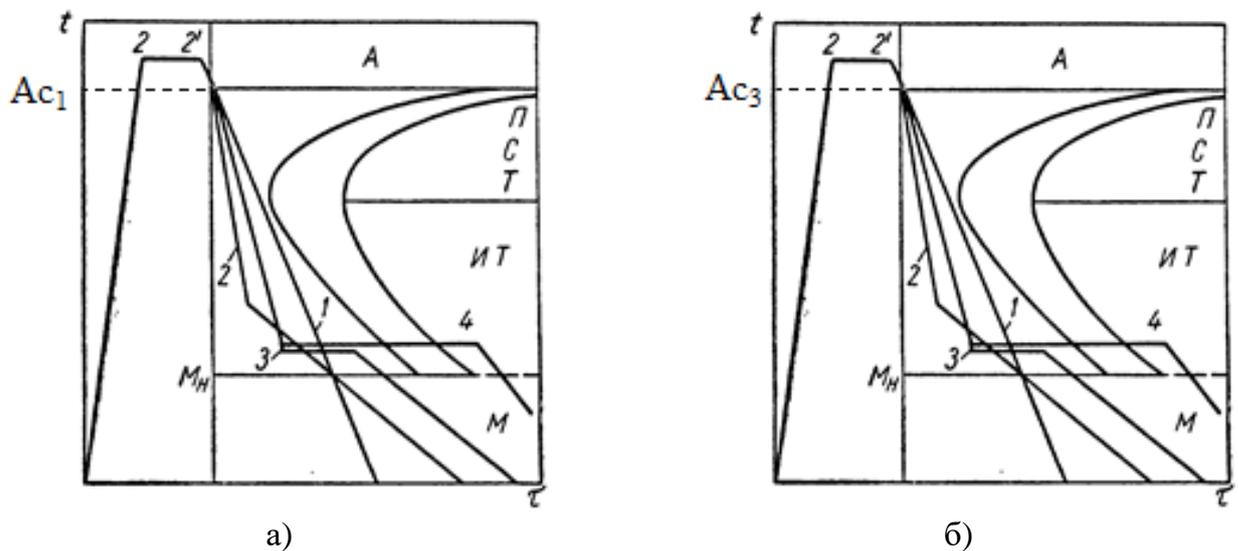
Процесс отжига характеризуется самым медленным охлаждением по кривой I (рис. 1.1), в результате которого получается наиболее пластичная и наименее прочная структура перлита. Таким образом, отжиг представляет собой процесс термообработки, состоящий из нагрева стали выше критических температур, выдержки и последующего медленного охлаждения для получения равновесной структуры перлита.

Если после нагрева и последующей выдержки охлаждение происходит более интенсивно по кривой II рисунка 1.1, то температура превращения аустенита в другую структуру будет ниже, чем для процесса отжига. В результат сталь приобретает

структуру перлитно-сорбитного типа. Подобный вид термообработки называется нормализацией.

При самом быстром охлаждении, соответствующем кривой III на рисунке 1.1, со скоростью выше критической скорости заковки, наблюдается мартенситное превращение, и обрабатываемое изделие приобретает свойства наиболее твердой мартенситной структуры. Такой вид тепловой обработки стали называется закалкой.

Главную цель закалки представляет повышение твердости закаливаемой детали за счет придания стали мартенситной структуры. Высокая скорость охлаждения при закалке необходима для того, чтобы избежать превращения аустенита в верхнем интервале температур и сохранения аустенитной структуры до начала мартенситного превращения. Типовой процесс закалки состоит из нагрева изделия на 20-30°С выше критических температур (A_{c1} – для эвтектоидной и заэвтектоидной стали, A_{c3} – для доэвтектоидной стали) и следующего за ним охлаждения со скоростью, выше критической скорости заковки. Схемы термических режимов закалки показаны на рисунке 1.2 (линия 1 – обычная закалка; линия 2 – закалка в двух охладителях; линия 3 – ступенчатая закалка; линия 4 – изотермическая закалка) [3, с. 204].



а – для эвтектоидной и заэвтектоидной стали; б – для доэвтектоидной стали

Рисунок 1.2 – Схемы термических режимов закалки

В общем случае применения одного охладителя, процесс закалки стального изделия при достаточно быстром охлаждении может привести к возникновению внутренних напряжений, а именно напряжений I рода, и, следовательно, к остаточным формоизменениям детали или к появлению трещин.

Внутренние напряжения в закаленном металлическом теле подразделяются на термические напряжения и фазовые или структурные напряжения. Первые возникают в результате неравномерного охлаждения по сечению из-за резкого снижения температуры поверхности изделия и отставании охлаждения сердцевины. Из-за сжатия поверхностных слоев обрабатываемой детали при уменьшении температуры поверхности и сохранения большего объема сердцевины, на поверхности заготовки возникают растягивающие термические напряжения, а в центре – сжимающие. В случае, когда термонапряжение превышает предел текучести, происходит пластическая деформация.

Фазовые или структурные напряжения возникают в результате увеличения объема обрабатываемого стального сплава при превращении аустенитной структуры в мартенситную. Поскольку поверхностные слои изделия первыми достигают температуры мартенситного превращения, именно в них наблюдается увеличение объема. В отличие от термонапряжений на поверхности детали наблюдаются сжимающие остаточные напряжения, а внутри заготовки – растягивающие. При достижении фазовыми напряжениями значения предела прочности, в заготовке могут появиться закалочные трещины.

Внутренние напряжения I рода, возникающие при закалке, представляют собой сумму термических и фазовых напряжений. Их распределение показано на рисунке 1.3. Как видно из рисунка, максимальное значение внутренних напряжений наблюдается в поверхностных слоях обрабатываемого стального полуфабриката [3, с.205].

С целью уменьшения величины остаточных напряжений, возникающих при закалке, рекомендуется замедление скорости охлаждения. При этом сокращается как величина термических напряжений за счет уменьшения перепада между температурой поверхности и сердцевины, так и величина фазовых напряжений, поскольку из-за более низкой скорости частично успевают произойти их перераспределение. Однако, основным условием закалки является охлаждение стальной заготовки со скоростью, превышающей критическую скорость закалки. Поэтому уменьшение скорости стадии охлаждения возможно только при температурах, мало отличающихся от температуры начала мартенситного превращения M_n . Кривая 2 на рисунке 1.2 соответствует закалке с высокой скоростью охлаждения в верхнем диапазоне температур и более низкой в нижнем. Такой режим закаливания называется закалкой в двух средах.

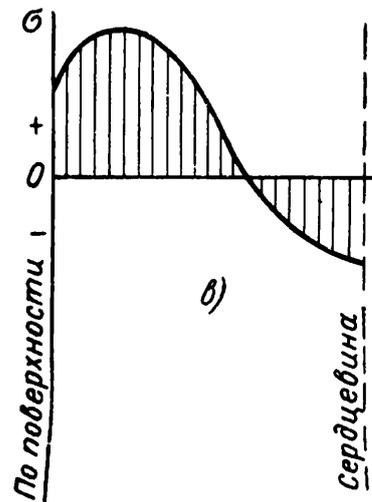


Рисунок 1.3 – Распределение остаточных внутренних напряжений I рода по сечению изделия при закалке

Другим возможным режимом закалки, позволяющей минимизировать влияния остаточных внутренних напряжений I рода, является ступенчатая закалка. Данный процесс заключается в охлаждении нагретого изделия, имеющего аустенитную структуру, до температуры, несколько превышающей температуру M_n , выдержке для получения максимально равномерного температурного распределения по сечению, и медленном охлаждении, чаще всего производимом на воздухе. Ступенчатая закалка представлена кривой 3 на рисунке 1.2.

Кривая 4 на рисунке 1.2 соответствует процессу изотермической закалки, который заключается в интенсивном охлаждении детали до температуры, лежащей выше точки M_n и изотермической выдержке в течение времени, необходимого для завершения всех фазовых превращений. Характерной особенностью данного режима закалки является то, что в результате его применения закаливаемая деталь приобретает структуру игольчатого троостита [1-3].

1.1.2 Виды и способы поверхностной закалки стали

Закаливание стальных изделий позволяет получить равновесную мартенситную структуру, которая характеризуется большей прочностью, но меньшей пластичностью по сравнению со структурой аустенита, получаемой после нагрева выше критических температур A_{c1} - A_{c3} . Часто в реальных промышленных условиях подобную твердость требуется получить не во всей обрабатываемой детали, а лишь в ее поверхностных слоях. Это обусловлено, во-первых, тем, что в результате закаливания повышается сопротивление истиранию, что имеет существенное значение при обработке деталей с

трущимися поверхностями. Во-вторых, закалка позволяет уменьшить влияние крутящих или изгибающих моментов и минимизировать вероятность появления усталостных трещин, в основном возникающих на поверхности изделия.

Существует три типовых способа поверхностного упрочнения стали: поверхностная закалка, химико-термическая обработка и поверхностный наклеп [2,3]. Последние два способа упрочнения сопровождаются изменением физико-химического состава поверхностного слоя обрабатываемого тела.

В диссертационном исследовании рассматриваются распространенные в промышленности процессы поверхностной закалки, связанные с упрочнением поверхностного слоя обрабатываемого изделия. Поверхностная закалка заключается в предварительном нагреве поверхностных слоев стальной детали выше критических температур образования аустенита и последующим скоростном охлаждении ниже температур мартенситного превращения. При этом глубина закаливаемого слоя зависит от прокаливаемости стали, которая в свою очередь определяется составом стали, ее строением, условиями нагрева и охлаждения.

В общем случае, различают два способа поверхностного закаливания стали: с подводом тепла к закаливаемому изделию от внешнего нагревателя и с образованием внутренних источников тепла в результате воздействия на металл электромагнитного поля. Существует несколько способов поверхностной закалки с нагревом от внешнего источника [2-3, 9-10].

Первый способ представляет собой помещение холодной стальной детали в жидкую нагревающую среду, чаще всего раствор солей или металлов, температура которой существенно превышает температуру закалки данного вида стали. Из-за существенной разности температур между греющей средой и деталью возникает градиент температур, который приводит к интенсивному нагреву поверхностного слоя выше критических температур A_{c1} - A_{c3} , в результате чего в нем образуется аустенитная структура. При последующем быстром охлаждении поверхность обрабатываемого изделия приобретает преимущественно мартенситную структуру. Рассмотренный способ поверхностной закалки используется для деталей простой геометрической формы и малых размеров.

Второй способ предполагает нагрев поверхности обрабатываемого изделия с помощью газовых горелок и охлаждение струей воды. В отличие от нагрева в жидкой

среде, данный вид поверхностной закалки позволяет производить упрочнение заготовок сложной геометрической формы и больших размеров. Недостатком данного метода является высокое влияние возмущений, к которым относятся колебания скорости движения газовой горелки или изменение расстояния от нее до поверхности детали, на получаемое температурное поле.

Третьим способом поверхностной закалки с внешним подводом тепла является нагрев в водном электролите. Суть метода заключается в помещении металлического полуфабриката в металлическую ванну с электролитом, подключенную к источнику питания. При этом, если нагреваемое тело является катодом, а ванна – анодом, то в газовом слое, окружающем изделие, возникает электрическая дуга, которая приводит к быстрому нагреву его поверхностного слоя. После прекращения подачи тока, электролит становится уже охлаждающей средой, которая осуществляет интенсивное охлаждение нагретого поверхностного слоя до характерных температур мартенситного превращения, за счет чего происходит его закалка. Недостатками данного метода является существенная подверженность коррозии и трудность контроля процесса нагрева.

В группу процессов поверхностной закалки с образованием тепла в результате воздействия на изделия электромагнитного поля входят: закалка при контактном нагреве и закалка при индукционном нагреве. Главные преимущества данных способов поверхностного упрочнения над описанными выше заключаются в возможности существенного ускорения нагрева за счет увеличения мощности электромагнитного поля, возможности применения локального нагрева заготовки, а также меньшем энергопотреблении [9-10].

1.1.3 Технология поверхностной индукционной закалки

Типовой процесс поверхностной индукционной закалки состоит из стадии нагрева до критических температур аустенитного превращения и стадии охлаждения до температур образования мартенситной структуры. Далее рассматриваются характерные особенности технологических режимов стадий поверхностной индукционной закалки.

Существует четыре основных режима нагрева в процессе индукционной закалки: статический, непрерывно-последовательный, последовательный и пульсирующий режимы (рис. 1.4). В случае применения статического режима нагреваемая деталь и

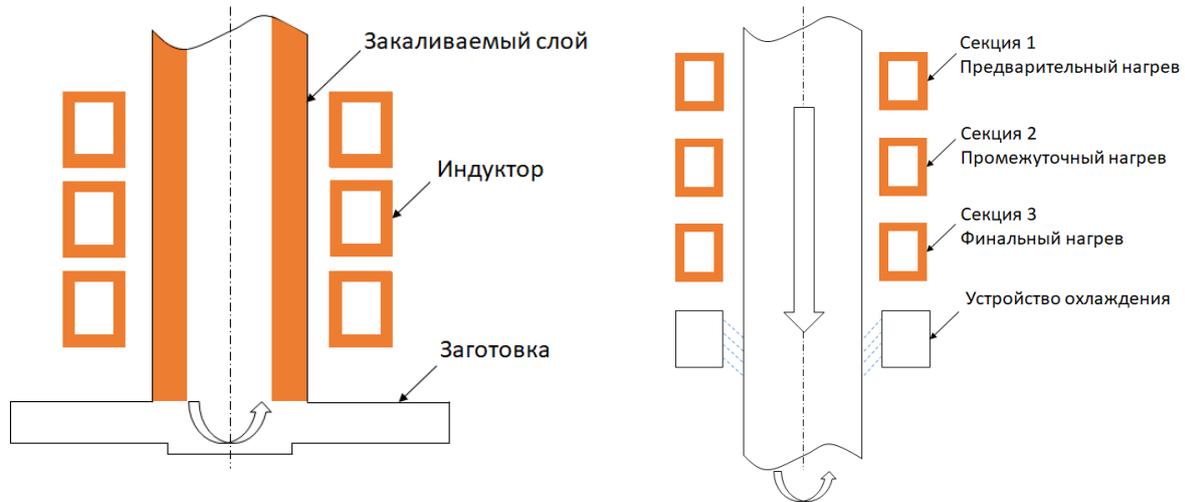
индуктор, в который она помещена, остаются неподвижными в течение всего процесса нагрева (рис. 1.4а) [1, с. 222]. В некоторых ситуациях для получения максимально равномерного температурного распределения в закаливаемом слое обрабатываемого изделия, оно может вращаться внутри индукционного нагревателя. Этот режим эффективно используется для локального нагрева, когда требуется добиться повышения прочности только в некоторой части заготовки. Типичными примерами подобных деталей являются коленчатые или распределительные валы и полуоси колес автомобилей.

При непрерывно-последовательном режиме обрабатываемая заготовка или индуктор совершают поступательное движение вдоль одной оси в течение процесса нагрева [1, с. 225]. Одной из характерных особенностей данного режима нагрева является возможность обработки деталей переменной длины и, в некоторых случаях, переменного диаметра. Кроме того, непрерывно-последовательный нагрев позволяет варьировать количество тепла, подаваемое к конкретной части изделия, за счет изменения скорости движения и мощности индуктора. С помощью такого режима нагрева обрабатываются рельсы, направляющие, валы и другие изделия постоянного сечения.

Последовательный режим нагрева осуществляется в несколько стадий с непрерывным движением заготовки последовательно от одной стадии или секции к другой (рис. 1.4б) [1, с. 225-226]. Такой режим термообработки обычно состоит из трех этапов: предварительного, промежуточного и финального нагрева. Чаще всего каждый этап реализуется в отдельной секции индуктора, ток и частота которой могут быть разными в зависимости от характеристик заготовки или требований процесса. Подобный режим нагрева используется при обработке деталей сложной геометрической формы, когда нагреву подвергают лишь отдельные части заготовки.

Пульсирующий режим используется для получения равномерного распределения температуры перед стадией охлаждения [1, с. 227]. Данный режим представляет собой серию кратковременных включений нагревателя с небольшой задержкой по времени между этими включениями. В течение этих перерывов в подаче питания на индуктор тепло от поверхностных слоев передается к сердцевине детали за счет теплопроводности, тем самым уменьшая разницу между температурами поверхности и

центра. Чаще всего такой режим нагрева применяется при необходимости контроля или поддержания температуры поверхности обрабатываемого тела.



а)

б)

а – статический режим; б – последовательный режим

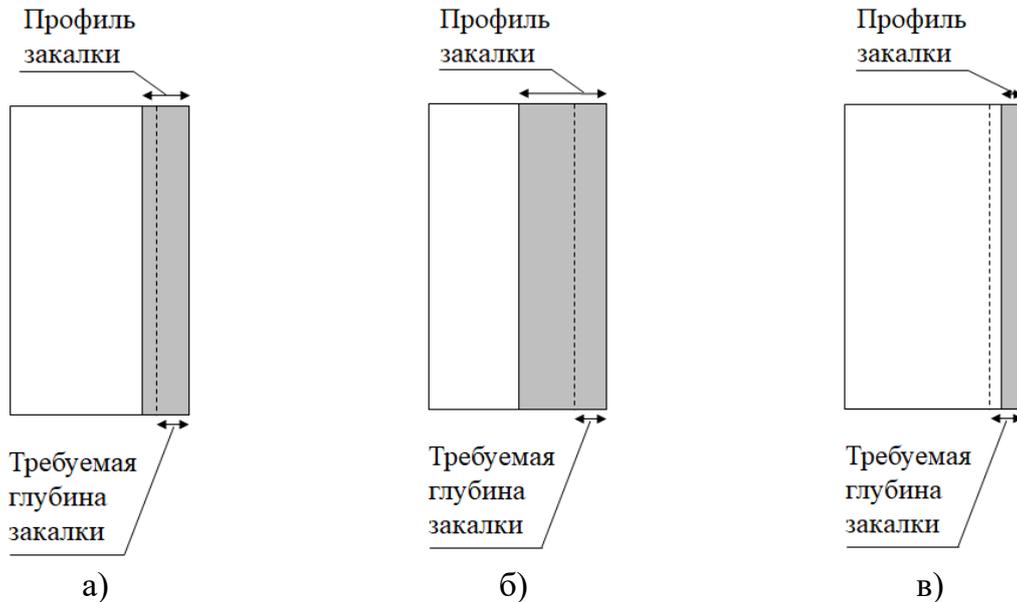
Рисунок 1.4 – Режимы нагрева в процессе индукционной заковки

Выбор того или иного режима нагрева в процессе индукционной заковки обуславливается формой и размерами нагреваемого изделия, требуемого профиля заковки, темпами производства и жесткостью требований к формоизменению деталей.

Одним из наиболее важных параметров, определяющих глубину закаливаемого слоя в процессе поверхностного упрочнения деталей, является частота питающего индуктор тока. Данный параметр, наряду с материалом изделия, определяет глубину проникновения тока в металл, то есть ширину зоны наиболее интенсивного нагрева. Значения частоты в типовом процессе поверхностной индукционной заковки варьируются от нескольких десятков до нескольких тысяч герц. На практике их чаще всего делят на три категории: низкие (до 10 кГц), средние (от 10 до 70 кГц) и высокие (выше 70 кГц) [1, с.229].

Выбор конкретного значения частоты обуславливается несколькими факторами. К ним относятся форма и размеры обрабатываемой детали, а также требуемая глубина закаливаемого слоя, в котором нужно получить мартенситную структуру металла. На рисунке 1.5 показана глубина заковки при оптимальном (а), недостаточном (б) и чрезмерном (в) значениях частоты питающего тока. В первом случае (рис 1.5а) частота подобрана таким образом, что глубина проникновения тока в нагретом металле была близка к требуемой ширине закаливаемого слоя. Во втором случае (рис. 1.5б) значение

частоты меньше необходимого. Это становится очевидно, поскольку ширина закаливаемого слоя сильно превышает требуемое значение. Чрезмерно большое значение частоты в случае (рис. 1.5в) приводит к появлению мартенситной структуры лишь в сравнительно небольшом поверхностном слое изделия, ширина которого меньше требуемого значения [1, с. 230].

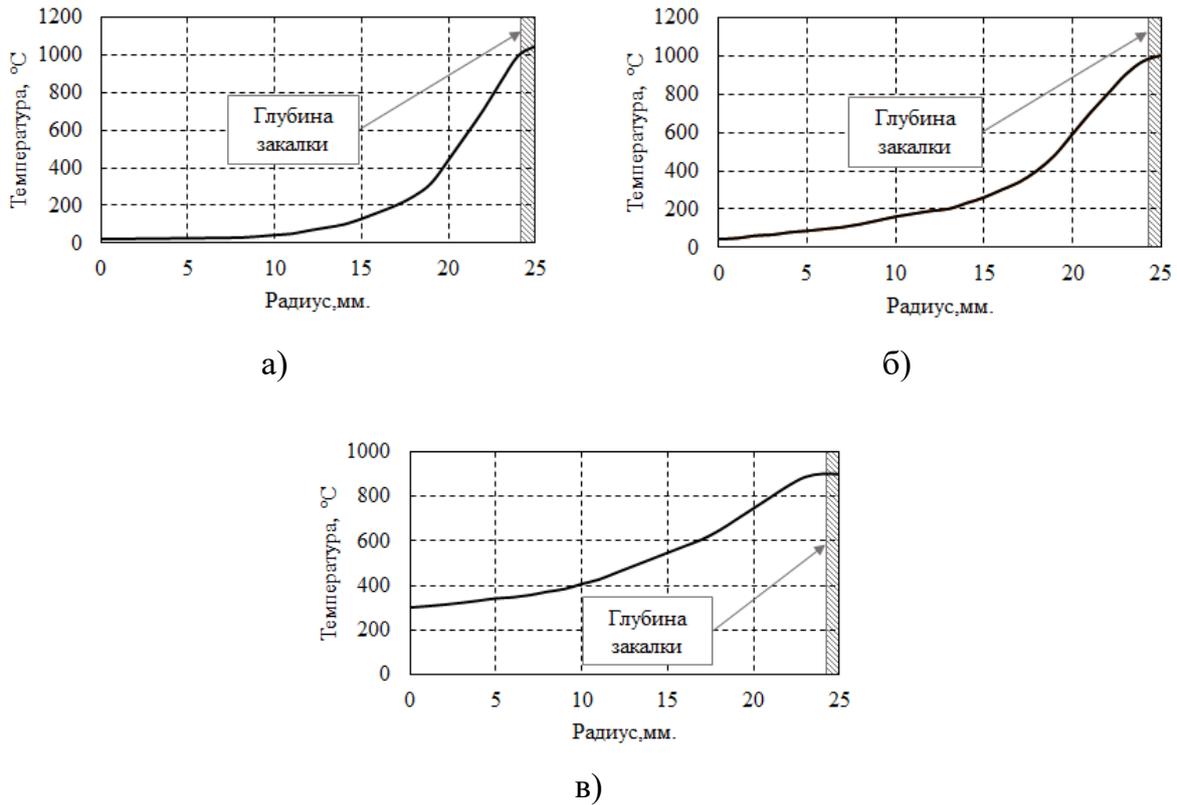


а – оптимальная частота; б – низкая частота; в – высокая частота

Рисунок 1.5 – Профили закалки при разных значениях частоты питающего тока

Технология поверхностной индукционной закалки также предполагает определение необходимой длительности стадии нагрева. В случае, когда время нагрева небольшое, прогревается только поверхностный слой изделия, ширина которого определяется глубиной проникновения тока в металл. При этом влияние внутренних источников тепла на сердцевину детали минимальное. Постепенное увеличение времени нагрева приводит к тому, что за счет теплопроводности тепло начинает передаваться от более нагретых участков заготовки к менее нагретым, тем самым увеличивая ширину закаливаемого слоя.

На рисунке 1.6а показано, что по окончании стадии нагрева длительностью 1.5с центр изделия по-прежнему имеет температуру близкую к начальной, в то время как в закаливаемом слое температура превышает критическую температуру образования аустенита. При увеличении длительности стадии нагрева до 3 с (рис. 1.6б) сердцевина детали достигает температуры 42°С, а до 10 с (рис. 1.6в) – температуры 304°С [1].



а – время нагрева 1с.; б – время нагрева 3с.; в – время нагрева 10с.
 Рисунок 1.6 – Радиальные температурные распределения по окончании стадии нагрева различной длительности

Известно, что величина растягивающих термонапряжений пропорциональна количеству тепла, индуцированного в обрабатываемом изделии. Следовательно, с увеличением длительности нагрева растет вероятность нежелательного формоизменения детали. В целях уменьшения величины термонапряжений необходимо, чтобы время нагрева в процессе поверхностной закалки принимало минимально возможное значение, за которое в рассматриваемом закаливаемом слое заготовки температура смогла бы достичь критической температуры аустенитного превращения.

Описанные ранее режимы нагрева для процесса закалки, форма и размеры обрабатываемого изделия, а также особенности процесса во многом определяют тип применяемой индукционной установки. Аналогично режимам нагрева индукторы могут быть разделены на следующие группы: непрерывно-последовательные, последовательные, статические и специальные.

Основное преимущество непрерывно-последовательных индукторов заключается в возможности их применения для закалки деталей различной длины. Количество витков таких нагревателей и их размеры зависят от требований конкретной задачи.

Индукторы этого типа также могут включать охлаждающую установку для осуществления полного цикла процесса индукционной закалки. При применении данного вида индукторов для получения наиболее равномерного нагрева могут перемещаться и нагреваемая деталь, и сам индуктор.

В случае, когда размер и форма изделия намного больше, чем размер и форма индукционной установки, выбор делается в пользу движения индуктора, в других случаях – заготовки [1].

Как уже было отмечено, для упрочнения поверхностного слоя заготовки, изготовленной из углеродистой стали, необходимо нагреть его до температуры закалки, которая обычно на 20-30°C превышает критическую температуру образования аустенита, а затем резко остудить ниже температуры мартенситного превращения [1-5]. Основной целью поверхностной закалки является получение однородной мартенситной структуры в упрочняемом слое равномерной глубины, которая зависит от равномерности нагрева границы закаливаемого слоя на первой стадии. В свою очередь, возможные перепады температуры, возникающие при нагреве, могут привести к уменьшению глубины закаленного слоя за счет локального недогрева отдельных его участков или, напротив, к расплавлению детали в случае существенного перегрева. При скоростном нагреве, которым характеризуется процесс поверхностной закалки, в упрочняемой заготовке также могут возникать температурные напряжения, которые на последующей стадии резкого охлаждения часто приводят к растрескиванию и выбраковке изделий [11-13]. В связи с этим, главной задачей стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки можно считать получение максимальной равномерности температурного поля в закаливаемом слое обрабатываемой детали за определенное технологией время нагрева при отсутствии перегрева поверхности заготовки.

Для обеспечения требуемого температурного профиля в упрочняемом слое заготовки при условии соблюдения всех предъявляемых технологических требований оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревательных установок или их режимов работы. Поэтому особенно важной становится задача оптимизации конструктивных характеристик индуктора [14-15] и его режимных параметров, которая в общем виде формулируется и содержательно раскрывается в последующих разделах главы.

1.2 Общая постановка задачи оптимизации индукционной нагревательной установки как объекта с распределенными параметрами

В процессах термической обработки металла качество конечного изделия существенно зависит от равномерности результирующего температурного поля по объему нагреваемого изделия, поэтому основной целью процесса индукционного нагрева можно считать достижение заданных температурных кондиций нагреваемых деталей [16-18].

Для достижения этой цели индукционная установка должна обладать определенными средствами, обеспечивающими достижение за конечное время заданного температурного состояния нагреваемых изделий, отличного от некоторого начального распределения температуры.

В этом случае процесс индукционного нагрева можно рассматривать в качестве объекта управления, для которого данные средства формирования заданного распределения температурного поля по объему нагреваемой заготовки являются управляющими воздействиями, а само изменяющееся во времени и пространстве температурное поле представляет собой управляемую функцию состояния. Поскольку управляемая функция состояния оказывается распределенной по пространственным координатам, процесс индукционного нагрева принципиально необходимо рассматривать как объект управления с распределенными параметрами [16, с.33].

Получение заданных температурных кондиций обрабатываемых деталей в конце нагрева возможно как за счет конструктивного исполнения индукционного нагревателя, так и с помощью использования различных режимов его работы, т.е. путем применения различных управляющих воздействий. Из множества возможных решений должен быть выбран такой способ, который является наилучшим с точки зрения определяемого конкретными требованиями показателя технико-экономической эффективности, оцениваемого с помощью некоторого критерия качества или критерия оптимальности [16, с.34].

Таким образом, возникает необходимость определения таких законов изменения управляющих воздействий или таких значений конструктивных параметров индуктора, которые обеспечивают получение заданного температурного состояния обрабатываемых заготовок при наибольшем или наименьшем (в зависимости от смысла конкретного показателя качества) значении выбранной целевой функции.

Для корректной постановки задачи оптимизации индукционной установки на первом этапе необходимо рассмотреть математическую модель рассматриваемого процесса индукционного нагрева как объекта с распределенными параметрами.

В общем случае пространственно-временное распределение температуры по объему заготовок, являющееся функцией состояния ОРП, описывается системой взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и температурного полей [19, 20].

Система уравнений Максвелла, описывающая электромагнитное поле внутри проводящего материала, может быть записана в следующем виде:

$$\operatorname{rot}\bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial\bar{D}}{\partial t}; \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot}\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}; \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div}\bar{B} = 0; \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div}\bar{E} = 0. \quad (1.4)$$

Здесь \bar{H} - вектор напряженности магнитного поля; \bar{E} - вектор напряженности электрического поля; t - время; \bar{B} - вектор плотности магнитного потока, \bar{D} - вектор электрической индукции (электрического смещения).

Поскольку количество неизвестных в (1.1) - (1.4) превышает количество уравнений, для решения системы уравнений Максвелла необходимо её дополнить следующими уравнениями [21, 22]:

$$\bar{D} = \varepsilon\varepsilon_0\bar{E}; \quad (1.5)$$

$$\bar{B} = \mu\mu_0\bar{H}; \quad (1.6)$$

$$\bar{J} = \sigma\bar{E}. \quad (1.7)$$

Подставляя (1.5) и (1.7) в выражение (1.1), получим следующее уравнение:

$$\operatorname{rot}\bar{H} = \sigma\bar{E} + \frac{\partial(\varepsilon\varepsilon_0\bar{E})}{\partial t}. \quad (1.8)$$

В подавляющем большинстве промышленных процессов индукционного нагрева металлических деталей используются токи высокой частоты, не превышающей 100 МГц. Это означает, что плотность тока проводимости значительно превышает плотность тока смещения, и вторым слагаемым в выражении (1.8) можно пренебречь. В этом случае получим более простое уравнение:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma \bar{E}. \quad (1.9)$$

Температурное поле в нагреваемой заготовке в наиболее общем виде описывается дифференциальным уравнением Фурье:

$$\alpha(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\beta(T) \operatorname{grad} T) + F(\bar{x}, T, u), \quad (1.10)$$

$$t \in (0, t^0); \bar{x} \in \Omega_r \subset E^r, 1 \leq r \leq 3.$$

Выражение (1.10) дополняется следующими краевыми условиями:

$$T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}); \beta(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\bar{x} \in S} = F_1(\bar{x}, t, T) \Big|_{\bar{x} \in S}, \quad (1.11)$$

где $T(\bar{x}, t)$ - пространственно-временное температурное распределение; \bar{x} - вектор пространственных координат; α, β - заданные достаточно гладкие функции своих аргументов; T_0 - начальное температурное распределение; F - удельная мощность внутренних источников тепла, создаваемых электромагнитным полем индукционной установки; n - нормаль к граничной поверхности S области $\bar{x} \in \Omega_r$; $u(\bar{x}, t)$ - управляющее воздействие.

Описанная функция состояния ОРП $T(\bar{x}, t, u(\bar{x}, t), \bar{P})$ в общем случае зависит от пространственно-временного управляющего воздействия $u(\bar{x}, t)$ или вектора основных конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы $\bar{P} = (p_i), i = \overline{1, N}$.

На втором шаге необходимо определить конкретные показатели качества или критерии оптимальности, характерные для технологического процесса, для которого и формулируется рассматриваемая оптимизационная задача. К типовым критериям оптимальности относятся критерии быстродействия, максимальной точности нагрева, минимального энергопотребления, минимальной себестоимости и др. [16-18].

В первом случае основным качественным показателем процесса индукционного нагрева металла является максимальная производительность нагревательной установки, которая может быть достигнута за счет минимизации времени t^0 процесса нагрева деталей до требуемой температуры:

$$I_1 = \int_0^{t^0} dt = t^0 \rightarrow \mathbf{min}. \quad (1.12)$$

В этом случае задача оптимального управления называется задачей оптимального быстрогодействия.

В случае, когда основной целью задачи оптимального управления является минимизация себестоимости продукции, в роли критерия оптимальности могут выступать различные показатели качества, к которым относятся точность нагрева, энергопотребление и потери металла в окалину.

В самом общем случае точность нагрева оценивается по максимальной величине абсолютного отклонения температурного распределения по объему заготовки в конце процесса нагрева $T(\bar{x}, t^0, u(\bar{x}, t), \bar{P})$ от заданного температурного распределения $T^*(\bar{x})$, а соответствующий критерий оптимальности можно записать в следующем виде:

$$I_2 = \max_{\bar{x} \in \Omega_r} |T(\bar{x}, t^0, u(\bar{x}, t), \bar{P}) - T^*(\bar{x})| \rightarrow \min. \quad (1.13)$$

Конечная стоимость изделия во многом зависит и от потребляемой в процессе нагрева энергии, которая может быть представлена в интегральной форме, что приводит к следующему виду критерия оптимальности в задаче на минимум расхода энергии:

$$I_3 = \int_0^{t^0} u(t) dt \rightarrow \min. \quad (1.14)$$

Поскольку термическая обработка металлов всегда сопровождается достижением высоких температур, то основная роль в формировании себестоимости процесса индукционного нагрева может принадлежать материальным затратам, большую часть которых обычно составляют потери металла в окалину. Величина этих потерь может быть оценена с помощью интеграла от нелинейной функции температуры поверхности обрабатываемой заготовки $f(T_{нов}(t))$. Тогда критерий оптимальности можно записать следующим образом [16-18]:

$$I_4 = \int_0^{t^0} f(T_{нов}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (1.15)$$

При необходимости все приведенные критерии могут учитываться одновременно, для чего формулируется задача оптимального управления с аддитивным критерием оптимальности:

$$I_\Sigma = \sum_{i=2}^4 C_i I_i + C_t t^0 \rightarrow \min. \quad (1.16)$$

В приведенном критерии C_i - относительная стоимость каждой из статей (1.13)-(1.15) общей себестоимости процесса нагрева, C_i - весовой коэффициент затрат, связанных с общим временем нагрева [16-18].

На следующем этапе постановки оптимизационной задачи необходимо определить управляющие воздействия для рассматриваемого процесса или выбрать параметры конструкции индуктора, оптимальные значения которых будут найдены в результате решения задачи оптимизации.

В общем случае управляющие воздействия можно разделить на три группы: сосредоточенные управления $u(t)$, к которым относятся воздействия, изменяющиеся во времени и не зависящие от пространственных координат; пространственные или распределенные управления $u(\bar{x})$, которые не изменяются во времени, но зависят от пространственных координат; и пространственно-временные управляющие воздействия $u(\bar{x}, t)$, изменяющиеся как во времени, так и по пространственным координатам [16-18]. Примерами управляющих воздействий первой группы могут являться: напряжение источника питания индуктора, частота питающего тока, полная мощность внутреннего тепловыделения и т.д. Примером реализации управлений второй группы может служить многосекционное исполнение индуктора с различающимися по величине, но неизменными во времени значениями напряжений на секциях. К управляющим воздействиям третьей группы относятся, например, автономно регулируемые по времени напряжения на отдельных секциях многосекционного индуктора или пространственно-временное управление мощностью внутренних электромагнитных источников тепла.

В роли оптимизируемых конструктивных параметров $\bar{P} = (p_i), i = \overline{1, N}$ индукционной нагревательной системы могут выступать геометрические параметры индуктора или электрические параметры источников питания.

На практике энергетические и материальные ресурсы, которыми располагает любой реальный технологический процесс, всегда оказываются ограниченными. В типовых случаях ограничения на оптимизируемые управляющие воздействия или конструктивные параметры задаются в виде определения некоторого интервала их возможного изменения, ограниченного максимальными и минимальными значениями, которые они могут принимать:

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}; \quad p_{i\min} \leq p_i \leq p_{i\max}. \quad (1.17)$$

В случае сосредоточенных управлений, достижение экстремального значения заданного критерия оптимальности в типовых задачах быстрогодействия или нагрева с максимальной точностью возможно именно при предельно допустимых, согласно (1.17), значениях управляющих воздействий. Для параметров конструкции индуктора, в свою очередь, задание ограничений в виде (1.17) продиктовано физически обусловленными ограничениями при проектировании индукционной нагревательной системы. В обоих случаях учет ограничений является обязательным этапом постановки задачи оптимизации [16, 23].

Кроме ограничений на управления, технология индукционного нагрева предъявляет ряд требований к результирующему температурному полю в конце процесса, что обуславливает необходимость задания дополнительных технологических ограничений. К таким ограничениям относятся, например, ограничение на максимальную температуру или растягивающие термонапряжения [1, 11-13, 24] в процессе нагрева. В первом случае, максимальное значение температуры $T(\bar{x}, t)$ по всему объему нагреваемой детали ограничивается на всем протяжении нагрева некоторой заданной предельно допустимой величиной T_{don} , превышение которой приводит к необратимым нежелательным изменениям структуры материала заготовки или в самом крайнем случае ее оплавлению. Данное ограничение записывается в следующем виде:

$$T_{\max}(t) = \max_{\bar{x} \in \Omega_r} T(\bar{x}, t, u(\bar{x}, t), \bar{P}) \leq T_{don}; \quad 0 \leq t \leq t^0. \quad (1.18)$$

Второе технологическое ограничение состоит в ограничении температурных перепадов по всему объему нагреваемого изделия таким образом, чтобы соответствующее им максимальное значение растягивающих термонапряжений σ_{\max} по всему объему нагреваемой заготовки не превышало заданной допустимой величины σ_{don} , определяемой пределом прочности материала [16]:

$$\sigma_{\max}(t) = \max_{\bar{x} \in \Omega_r} \sigma(\bar{x}, t, u(\bar{x}, t), \bar{P}) \leq \sigma_{don}; \quad 0 \leq t \leq t^0. \quad (1.19)$$

В реальных производственных условиях на результирующее температурное поле заготовки влияют многочисленные нежелательные факторы, которые называются возмущающими воздействиями. Возмущения возникают как по причине взаимодействия

индукционной нагревательной системы с окружающей средой, так и вследствие изменения характеристик материала нагреваемой заготовки или других параметров индукционной нагревательной системы относительно расчетных значений. Последние происходят из-за недостаточной изученности самого объекта или по причине неопределенности его исходных данных.

Все основные возмущения можно разделить на две группы: функциональные и параметрические. К функциональным возмущениям относятся, например, не полностью известное заранее начальное распределение температуры по пространственной координате, нестабильность напряжения источника питания или частоты питающего тока. Параметрическими возмущениями являются неточно известные электромагнитные и теплофизические характеристики материала обрабатываемой детали [16-18, 25-26]. К подобным характеристикам относятся, например, начальная температура обрабатываемой детали, коэффициент теплообмена с поверхности, магнитная проницаемость, теплопроводность и объемная теплоемкость материала заготовки, которые часто задаются с точностью до некоторого диапазона их изменения:

$$\bar{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) \in \Omega: \beta_{j_{min}} \leq \beta_j \leq \beta_{j_{max}}; j = \overline{1, k}. \quad (1.20)$$

Здесь $\bar{\beta}$ - вектор не полностью определенных k параметров исследуемого процесса, интервалы допустимых значений которых задаются некоторыми максимальными и минимальными значениями $\beta_{j_{min}}$, $\beta_{j_{max}}$ и объединены в множество Ω .

Поскольку главной целью процессов индукционного нагрева является получение заданных температурных кондиций, при постановке задачи оптимизации первостепенное значение приобретает формулировка требований к конечному температурному полю в заготовке. Обычно подобные требования применительно к температурным режимам индукционного нагрева металла формулируются в виде задания допустимой величины ε максимального абсолютного отклонения температуры $T(\bar{x}, t^0, u(\bar{x}, t), \bar{P})$ в конце процесса от заданного значения T^* по всему объему нагреваемого тела [16-18]:

$$\max_{\bar{x} \in \Omega_t} |T(\bar{x}, t^0, u(\bar{x}, t), \bar{P}) - T^*| \leq \varepsilon. \quad (1.21)$$

Таким образом, в общем виде задача оптимизации индукционной нагревательной установки сводится к поиску таких значений конструктивных параметров

$\bar{P} = (p_i)$, $i = \overline{1, N}$ или такой программы изменения во времени и по пространственным координатам управляющего воздействия $u(\bar{x}, t)$, стесненных ограничениями вида (1.17), которые обеспечивают перевод объекта, описываемого уравнениями (1.2)-(1.4), (1.6), (1.9)-(1.11), из заданного начального (1.11) в требуемое конечное состояние (1.21) при минимальном значении выбранного критерия оптимальности (1.12)-(1.16) в условиях наличия ограничений вида (1.18)-(1.19) и интервальной неопределенности его основных параметров (1.20).

Задача, в ходе решения которой находятся оптимальные параметры конструкции индукционной установки, представляет собой задачу оптимального проектирования. В свою очередь поиску закона изменения во времени и по пространственным координатам управляющего воздействия осуществляется при решении задачи оптимального управления.

Обе сформулированные задачи могут быть решены только с помощью специальных методов оптимизации систем с распределенными параметрами, обзор которых представлен в следующем разделе.

1.3 Современные методы оптимизации систем с распределенными параметрами

В данном разделе представлена общая характеристика и проанализированы основные особенности современных методов решения задач оптимизации объектов и систем с распределенными параметрами.

В [18] отмечено, что поскольку модели ОРП, учитывающие зависимость управляемых функций состояния от пространственных координат, представляются в форме дифференциальных уравнений в частных производных, интегральных, интегро-дифференциальных и других уравнений или систем таких уравнений [27-32], возникает необходимость разработки специальных методов решения задач оптимального управления, целью которых является распространение известных результатов теории оптимального управления на объекты с распределенными параметрами. В этом направлении в последние десятилетия достигнуты существенные успехи.

В общем случае задачи оптимального управления делятся на две группы взаимосвязанных задач: задачи программного оптимального управления по переводу

объекта из заданного начального в требуемое конечное состояние и задачи синтеза оптимальных регуляторов в замкнутых системах с обратными связями [18, с. 18].

Для решения задач программного оптимального управления могут применяться необходимые условия оптимальности либо непосредственно в форме принципа максимума Понтрягина (в условиях практически малостеснительных ограничений), либо в специальных формах его обобщения на случай распределенных систем, описываемых интегральными соотношениями или уравнениями в частных производных [33]. Однако, в данном случае бесконечная размерность системы уравнений в краевой задаче принципа максимума значительно повышает сложность ее решения, поскольку точное интегрирование этой системы выполнить невозможно [18, 34]. Кроме того, при применении принципа максимума для систем с распределенными параметрами, возникает необходимость формирования соответствующих условий трансверсальности, аналогичных случаю систем с сосредоточенными параметрами, в бесконечномерном фазовом пространстве.

Наиболее часто для преодоления указанных трудностей используется переход к конечномерным аппроксимациям моделей ОРП [18, 27, 29, 31, 35]. При этом для случая с фиксированным правым концом траектории решается ряд задач оптимального управления «усеченными» моделями объекта, задаваемыми конечным числом N соотношений с заданными конечными значениями первых N фазовых переменных. При этом величина N увеличивается до момента, когда при $N=N^*$ погрешность в достижении требуемого конечного состояния объекта не снижается до допустимого уровня. Каждая из подобных задач решается с помощью известных методов оптимального управления системами с сосредоточенными параметрами. Однако, применение данного подхода также имеет определенные недостатки, среди которых: неразрешимость краевой задачи оптимального управления для «усеченного» описания объекта при $N=N^*$ из-за неуправляемости точной модели относительно заданного конечного состояния ОРП [18, 34]; неточность приближенных алгоритмов управления по минимизируемому критерию оптимальности в сравнении с точным решением задачи оптимального управления при тех же погрешностях отклонения от конечного состояния ОРП; более сложная форма алгоритмов управления при $N=N^*$ по сравнению с точным решением задачи оптимального управления; неравномерность пространственного распределения погрешности отклонения от заданного конечного состояния ОРП [27, 29, 31].

Как показано в [18], эффективным подходом к решению сложных краевых задач оптимального управления ОРП с заданным конечным состоянием объекта является применение метода моментов и основанных на нем вычислительных алгоритмов [27, 29, 31, 36-38]. В общем случае задачу перевода ОРП в требуемое конечное состояние согласно этому методу можно рассматривать как бесконечномерную проблему моментов, которая сводится к поиску такого управляющего воздействия $u(z), z \in D^*$, которое при заданной бесконечной системе функций $g_n(z)$ и числах $\gamma_n, n = 1, 2, \dots, N, N \leq \infty$ является решением бесконечного числа следующих интегральных уравнений:

$$\gamma_n = \int_{D^*} g_n(z) u(z) dz, n = 1, 2, \dots, N. \quad (1.22)$$

Интегралы в выражении (1.22) называются моментами функции $u(z)$ относительно последовательности элементов $g_n(z)$, а числа γ_n являются заданными значениями этих моментов [18].

Основным преимуществом метода моментов перед непосредственным применением принципа максимума Понтрягина является возможность вычисления конечных значений сопряженных переменных путем решения соответствующей задачи (§4 в [18]). Однако при $N \rightarrow \infty$ в (1.22) точное решение подобной бесконечномерной проблемы моментов отыскать невозможно, в связи с чем, рассматривается усеченная проблема при $N < \infty$ интегральных соотношений для первых N мод управляемой величины. При этом такое конечномерное представление может также не иметь решений даже при относительно небольшом значении N по причине неуправляемости ОРП относительно заданных начальных и конечных состояний, что является главным недостатком данного метода [18].

Сложный характер задач оптимального управления ОРП достаточно редко позволяет получить точное решение в замкнутой аналитической форме. Полное аналитическое решение задач оптимального управления ОРП с помощью описанных условий оптимальности возможно получить, как правило, лишь применительно к типовым линейным моделям объекта и наиболее характерным критериям оптимальности простейшего вида. Даже в ситуациях, когда применение этих условий позволяет получить структуру искомым управляющих воздействий, возникает самостоятельная проблема определения конкретных значений параметров оптимальных

алгоритмов в найденном классе их зависимостей от временного и пространственного аргументов [18].

В большинстве случаев для нахождения таких параметров на определенных этапах используются различные численные методы оптимизации, как правило, базирующиеся на соответствующих необходимых условиях оптимальности систем с распределенными параметрами.

В настоящее время существует ряд таких численных методов, используемых при решении задач управления объектами, как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами, которые могут быть разделены на две группы по применяемому в них «способу дискретизации» уравнений объекта [27, 31-32, 39-47].

Методы первой группы основаны на предварительной конечномерной аппроксимации уравнений рассматриваемого объекта и применении при решении теории оптимального управления системами с сосредоточенными параметрами или методов конечномерной оптимизации. Подобная дискретизация достигается, например, за счет рассмотрения лишь конечного числа N дифференциальных уравнений из исходной бесконечной системы модального описания объекта, или при дифференциально-разностной аппроксимации уравнений объекта. Однако, полученные при подобном переходе сосредоточенные системы не всегда учитывают существенные физические особенности рассматриваемого объекта, связанные с пространственным распределением управляемой величины. Кроме того, достижение необходимой точности приближения полученного объекта с сосредоточенными параметрами к объекту с распределенными параметрами часто возможно лишь при достаточно большом N , что приводит к значительным трудностям при решении задач оптимального управления [18, с. 297].

К первой группе методов относятся и все способы приближенной редукции задачи оптимального управления к соответствующим задачам математического программирования на условный минимум конечного числа переменных, которые обычно формулируются либо при переходе к конечно-разностным схемам (сеточная аппроксимация), либо при исходном разложении управляющих воздействий по некоторой конечной системе заранее заданных базисных функций с неизвестными коэффициентами, а исходная задача при этом сводится к их поиску (проекционная аппроксимация) [18, 46-49].

При этом применение сеточной аппроксимации приводит к задачам математического программирования высокой размерности, решение которых с помощью стандартных методов становится затруднительным. При проекционной аппроксимации размерность задачи удается снизить при удачно выбранной системе базисных функций, однако, общие правила такого выбора отсутствуют [18, с. 298].

Методы второй группы предполагают непосредственное использование исходных моделей объектов с распределенными параметрами, задаваемых бесконечными системами дифференциальных уравнений или уравнениями в частных производных с применением процедур аппроксимации на завершающих этапах расчета по найденным вычислительным алгоритмам. Поскольку в данном случае в ходе решения задачи оптимального управления учитываются все характерные особенности распределенных систем, применение данных методов оказывается предпочтительным.

Наиболее широко используемыми методами второй группы являются различные модификации метода вариаций в пространстве управлений, которые предполагают разработку итерационной процедуры построения минимизирующей последовательности управляющих воздействий, обеспечивающая в условиях выполнения всех ограничений последовательное уменьшение заданного показателя качества управления на каждом шаге с окончательным достижением его оптимального значения с требуемой точностью [27, 31-32, 39-42, 46-47, 50]. Основным элементом указанного метода является способ вычисления вариаций управляющего воздействия в ходе итерационного процесса с учетом заданных ограничений, который приводит к различным модификациям рассматриваемого численного алгоритма [18, с. 299].

Стандартные методы оптимизации, такие, как методы проекции градиента, условного градиента, возможных и сопряженных направлений, штрафных функций также могут применяться при решении задач оптимального управления объектами с распределенными параметрами, но их реализация может сопровождаться значительными трудностями [41-42].

Достаточно эффективным по ряду показателей методом при решении широкого круга задач оптимального управления распределенными системами является метод последовательной линеаризации [18, 47]. Согласно данному методу на каждой $m+1$ -ой итерации для линеаризованных уравнений объекта рассматривается задача оптимального управления на минимум малого приращения минимизируемого критерия,

вызванного относительно малой вариацией управления $\Delta u^{(m)}$, которое ищется в форме его линейного приближения по величине градиента, вычисляемого при управлении $u^{(m)}$, полученном на предыдущей m -ой итерации. После вычисления $\Delta u^{(m)}$ находится управление $u^{(m+1)} = u^{(m)} + \Delta u^{(m)}$.

Другим известным методом второй группы является непосредственное применение необходимых условий оптимальности в форме принципов максимума, который сводится к численному решению соответствующей краевой задачи оптимального управления [40-42, 45, 47]. Согласно указанному подходу решение краевой задачи оптимального управления заключается в ее параметризации, т.е. поиску конечного числа некоторых неизвестных параметров, в роли которых могут выступать начальные значения сопряженных переменных [18]. Во многих случаях применение принципов максимума позволяют уже на предварительном этапе, используя специфические особенности рассматриваемой системы, осуществить ее конечномерную параметризацию по совокупности параметров, определяемых физическим истолкованием управляющих воздействий. При этом подобная процедура параметризации часто может быть осуществлена точно при малом числе определяющих параметров, и, следовательно, не сопровождается погрешностями ее аппроксимации [17-18, 51]. Основные трудности применения данного метода заключаются в том, что конкретное численное решение краевой задачи возможно только для конечномерного представления модели объекта, то есть конечного числа $N_1 < \infty$ уравнений, а также в отсутствии необходимой информации о начальных значениях всех $2N_1$ переменных, как фазовых, так и сопряженных [18].

Одним из наиболее эффективных способов решения задачи оптимального управления является ее предварительная параметризация, т.е. определение конечного числа некоторых параметров, которые позволяют качественно описать алгоритмы оптимального управления. Во многих случаях такая параметризация может быть выполнена после применения принципа максимума Понтрягина на основе использования закономерностей предметной области каждой конкретной задачи. Полученная конечная совокупность параметров определяется физическим истолкованием рассматриваемых управляющих воздействий [18, с. 302].

При этом искомые оптимальные управляющие воздействия оказываются заранее заданными с точностью до конечного числа параметров, за счет чего возможно получение зависимостей результирующих значений фазовых координат от выделенных параметров с помощью прямого интегрирования уравнений объекта (исключая уравнения сопряженной системы). Если при этом число подобных параметров конечно и равно числу заданных соотношений для итогового состояния объекта, то задача сводится к системе уравнений относительно новых неизвестных, существенно более простой по сравнению с исходной.

Особо важен случай, при котором такая процедура параметризации искомых управляющих воздействий выполняется точно при малом числе определяющих параметров применительно к полной бесконечной системе уравнений ОРП и, следовательно, не сопровождается в таких случаях погрешностями ее аппроксимации [17, 23, 51].

При этом параметризация указанного типа оказывается наиболее эффективной в тех случаях, когда краевая задача принципа максимума содержит ярко выраженные нелинейности, и ее решение становится весьма затруднительным.

Приведенный способ параметризации существенно отличается от формальной параметризации, проводимой при редукции исходной задачи оптимального управления к задаче математического программирования и характеризующейся погрешностями моделирования исследуемых процессов, а также большим, чем на порядок, числом искомых параметров, которые имеют совсем другой содержательный смысл.

Достаточно эффективным алгоритмически точным методом решения типовых задач оптимального управления системами с распределенными параметрами, базирующимся на указанном способе параметризации, является альтернативный метод [16-18]. Данный метод применительно к процессам индукционного нагрева основывается на доказанных универсальных свойствах результирующих оптимальных температурных полей, подобных известным в математике свойствам наилучших равномерных приближений заданных функций к нулю. Согласно этим свойствам, решение задачи оптимального управления с подвижным правым концом траектории сводится к получению по определенным правилам и дальнейшему решению системы трансцендентных уравнений для точек с предельно допустимым отклонением температуры от заданной, число которых всегда не меньше числа искомых параметров

оптимального процесса [16-18, 23, 51]. Причем отклонения температуры в указанных точках оказываются знакопередающимися, то есть обладают альтернансным свойством, а порядок их следования определяется спецификой рассматриваемого процесса. Основным преимуществом данного метода по сравнению с описанными ранее способами решения задачи оптимального управления является его применимость практически к любому числу N уравнений ОРП и возможность распространения на разнообразные задачи оптимизации [17].

Описанные выше методы используются при решении задач оптимального программного управления и позволяют отыскать искомые алгоритмы в виде программ изменения во времени управляющих воздействий и функции состояния ОРП. Существенно более сложной является задача синтеза замкнутой системы оптимального управления с обратными связями, решением которой является управление u^* как функция управляемой величины на выходе ОРП [18, 52]. В данном случае, в отличие от задачи программного управления, управляющие воздействия изменяются во времени, но не обязательно по пространственной координате. В таких замкнутых системах обеспечивается автоматическая отработка оптимальной программы $u^*(x, t)$ с допустимой погрешностью в условиях действия различных возмущающих воздействий. Причем подобный закон изменения во времени и по пространственной координате управления выполняется как при полной информации об ОРП, так и при ограниченной неопределенности его характеристик. При решении задач синтеза в некоторых случаях используются необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума [46], а также метод динамического программирования [40, 53-55]. Следует отметить, что в диссертационной работе задача синтеза замкнутой системы оптимального управления не рассматривается.

Рассматриваемые в диссертационной работе задачи оптимального проектирования представляют собой задачи полубесконечной оптимизации, которые сводятся к поиску конечного числа неизвестных оптимизируемых параметров с бесконечным числом ограничений. Таким образом, в отличие от задач оптимального управления, задачи проектирования оказываются изначально параметризованными и могут быть решены с помощью методов параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами.

В настоящее время наибольшее распространение при решении подобных задач получили недетерминистские методы, использующие принципы естественной эволюции, к которым относятся генетические (GA, NSGA-II) и мутационные алгоритмы (M-NSGA, AGDEMO, ASDEMO) [56-60]. Указанные стохастические методы не являются гарантированно точными и не позволяют получить оптимальное решение, однако с их помощью можно ускорить решение задачи в тех случаях, когда точное решение не может быть найдено или сопряжено с серьезными затруднениями. В отличие от приведенных алгоритмов, описанный ранее альтернативный метод параметрической оптимизации позволяет гарантированно получить оптимальное решение в задаче оптимального проектирования за счет её точной редукции к системам трансцендентных уравнений, которые являются замкнутыми относительно всех неизвестных оптимизируемых параметров.

В дальнейшем в диссертационном исследовании альтернативный метод используется как основа для разработки методики решения задачи оптимального проектирования индуктора и алгоритм решения задачи оптимального по быстрдействию управления процессом поверхностной индукционной закалки.

1.4 Содержательная постановка задачи диссертационного исследования и степень разработанности темы

Впервые задачи оптимального управления в процессах термообработки рассматривались в работах А.Г. Бутковского, С.А. Малого, Э.М. Гольдфарба при нагреве с использованием газовых печей [27, 29, 61].

Методы теории оптимального управления успешно применялись при решении задач оптимизации процессов нагрева металла перед операциями пластической деформации в печах с внешним теплообменом [27-32]. Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале применения методов оптимизации для повышения технико-экономических показателей нагревательных установок и совершенствования качества технологических процессов.

С.А. Малый в своих работах [31-32, 61] достиг значительных успехов в области повышения экономической эффективности процессов нагрева металла, в частности минимизации эффектов термохимических взаимодействий, а именно минимизации потерь металла в окалину. Значимые результаты получены при решении задач

оптимизации температурных режимов в пламенных печах по комплексному экономическому критерию, в который помимо потерь на окисление металла, входят расходы на энергопотребление и другие составляющие затрат.

Исследования в работах [31, 39] посвящены изучению проблемы оптимального проектирования нагревательных установок, суть которой заключается в поиске определяющих конструктивных параметров оборудования или характеристик их режимов работы, обеспечивающих получение экстремальных значений выбранных целевых функций. Методика решения задач оптимального проектирования и управления нагревательных комплексов в условиях неопределенности предложена в работе [39].

В большинстве приведенных исследований рассматриваются задачи оптимального проектирования и управления, решаемые с помощью упрощенных аналитических моделей процесса индукционного нагрева. В настоящее время все больше отечественных и зарубежных ученых при решении задач оптимизации используют модели, построенные с помощью современных программных средств численного компьютерного моделирования. Несмотря на более жесткие требования к вычислительным ресурсам, численные модели позволяют учесть краевые эффекты, нелинейные зависимости свойств материалов от температуры, сложный характер теплообмена с окружающей средой, а также другие присущие процессам индукционного нагрева металла усложняющие факторы.

В настоящее время проблеме оптимального проектирования индукционных нагревательных установок по различным критериям качества посвящены работы А. Алиферова, П. Ди Барбы, М. Форцана, А.Н. Никанорова, Б. Наке, Д. Запаты, Т. Мэйнарда, С.А. Галунина, Э. Бааке, Т. Леука, С. Наджи, Л. Якубовичевой, А. Гашпареца, Э.Я. Рапопорта, В.Б. Демидовича, А.Б. Кувалдина, А.Р. Лепешкина и др. российских и зарубежных ученых. Значимые результаты в области оптимизации процессов поверхностной индукционной закалки достигнуты в исследованиях Н. Барка, А. Чебака, Д. Хомберга, И. Соколовски, Ф. Дугиеро, М. Баттистетти, и др.

В работе [59] рассматривается многокритериальная задача оптимального проектирования индукционной установки, критериями в которой являются максимальная электрическая эффективность и максимальная плотность тока. Решение задачи находится с помощью метода геометрического программирования на основе аналитической модели процесса индукционного нагрева стали. Для учета нелинейных

свойств материала заготовки на последнем шаге используется конечно-элементная модель.

Решению задачи оптимизации конструкции индуктора на основе многомерных численных моделей с помощью генетических алгоритмов посвящены труды [56, 63]. Рассматривается оптимальное проектирование нагревательной установки, обеспечивающей максимально равномерный нагрев стальных труб с целью уменьшения влияния растягивающих термонапряжений [63], а также задача поиска оптимальных конструктивных параметров нагревателя для гомогенного нагрева тонких стальных пластин в поперечном магнитном поле [56]. Задача поиска оптимального дизайна индуктора для нагрева стальных пластин с помощью алгоритма Нелдера-Мида также решается в работе [64].

В работе [60] авторами предложен новый само адаптирующийся эволюционный метод оптимизации применительно к задаче оптимального дизайна индуктора для зонного нагрева стальных заготовок перед операциями пластической деформации.

Существенные результаты в области разработки автоматизированной процедуры оптимизации конструктивных параметров индуктора на базе генетических алгоритмов были получены в работе [65]. Рассматривалась трехмерная численная модель процесса индукционного нагрева, построенная в программном пакете FLUX, которая затем была использована в оптимизационной процедуре, разработанной в Python.

Исследования Обуховой А.В. и Клочковой Н.Н. [66-67] посвящены оптимальному проектированию индукционной нагревательной установки, обеспечивающей максимально равномерный нагрев определенных областей металлической заготовки сложной геометрической формы, с помощью конечно-элементных моделей. В роли критериев оптимальности в данном случае выступают время нагрева и затраты энергии.

В трудах Э.Я. Рапопорта и Ю.Э. Плешивцевой [16-18, 23] приведена наиболее полная систематизация методов оптимального управления системами с распределенными параметрами, в которых управляемой функцией состояния является изменяющееся в процессе индукционного нагрева пространственно-временное распределение температурного поля. В работе [68] решается многокритериальная задача оптимизации применительно к процессу индукционного нагрева на базе альтернативного метода. Работа [26] посвящена многокритериальной оптимизации в условиях наличия интервальной неопределенности параметров рассматриваемого процесса.

В трудах [69-70] авторами решены задачи оптимального проектирования индуктора непрерывного действия с помощью альтернативного метода оптимизации на основе численных многомерных моделей процесса индукционного нагрева.

В работах А.Н. Никанорова и С.А. Галунина [71-73] получены существенные результаты в области оптимизации конструкции нагревательных установок для поверхностной закалки стальных валов и шестерней с помощью генетических алгоритмов.

Оптимизация параметров индукционного нагревателя на примере поверхностной закалки шестерни с помощью градиентного метода на базе численной модели рассматривается в работе [74].

В работе [75] решается задача поиска оптимального дизайна индуктора, обеспечивающего получение максимально равномерной глубины закаливаемого слоя стальной детали сложного геометрического исполнения. При решении данной задачи авторами разработана численная модель стадии нагрева в пакете COMSOL Multiphysics, а равномерность результирующего температурного поля достигается за счет использования концентраторов магнитного потока и индуктора неканонической формы.

В диссертационных исследованиях [76-77] рассматриваются актуальные задачи проектирования специализированных энергоэффективных систем индукционного нагрева изделий сложной геометрической формы. Работа [78] посвящена разработке индукционных нагревателей для нагрева вращающихся дисков турбин авиационных двигателей.

Анализ представленных в литературных источниках исследований показывает, что на сегодняшний день имеется существенный задел в области оптимизации конструктивных характеристик индукционных нагревательных установок различного действия применительно к аналитическим моделям, а также активно возрастает применение проблемно-ориентированного на задачи оптимизации численного моделирования. Большинство задач оптимизации на базе численных моделей решается с помощью эволюционных алгоритмов оптимизации применительно к процессу индукционного нагрева.

В то же время, следует отметить, что проблема оптимального проектирования и управления режимами работы индукторов для поверхностной закалки изучена недостаточно. Принципиальные особенности данного процесса, связанные с

фундаментальными физическими явлениями, обуславливающими необходимость решения задач оптимизации конструкций индуктора и режима его работы, были подробно рассмотрены ранее. Была также обоснована необходимость обеспечения при индукционном нагреве равномерного распределения температуры в поверхностном слое изделия для исключения в дальнейшем на стадии закалочного охлаждения структурной неоднородности и разброса прочностных характеристик по глубине слоя. Кроме того, было показано, что достижение максимальной точности нагрева снижает вероятность возникновения критического уровня закалочных напряжений, способных привести к недопустимым дефектам типа трещин.

В диссертационной работе стадия нагрева процесса поверхностной индукционной закалки стальных заготовок является предметом исследования. Поскольку температурное поле по объему обрабатываемой детали в процессе нагрева изменяется не только во времени, но и по пространственной координате, указанная стадия нагрева рассматривается как объект управления с распределенными параметрами. Для анализа взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок в диссертации разрабатывается проблемно-ориентированная численная нелинейная модель индукционной нагревательной системы в программном пакете Altair FLUX.

В работе формулируется задача оптимального проектирования индукционной установки для стадии нагрева процесса поверхностной закалки, в которой в качестве критерия оптимизации выступает минимизация максимального абсолютного отклонения температуры на границе закаливаемого слоя от требуемого значения. Разрабатывается методика решения рассматриваемой задачи на основе альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами. Проводится анализ полученных результатов и оценка эффективности рассматриваемого метода оптимизации на основе сравнения с генетическими алгоритмами.

В работе формулируется и решается задача оптимального проектирования в условиях наличия интервальной неопределенности характеристик процесса, к которым относятся начальная температура заготовки и коэффициенты теплоотдачи с поверхности нагреваемой заготовки. При интенсивном нагреве, которым характеризуется процесс поверхностной закалки, большую часть совокупных тепловых потерь составляют потери за счет излучения, поэтому интервальная неопределенность в

данном случае задается для коэффициента лучистого теплообмена. В ходе решения задачи анализируется влияние заданного диапазона изменения неопределенных факторов на получаемую при решении точность нагрева.

В процессе скоростного нагрева, в ходе которого заготовка нагревается до температур, существенно превышающих точку Кюри, на поверхности изделия часто наблюдается существенный перегрев, который может привести к растрескиванию или выбраковыванию упрочняемой заготовки. Введение дополнительного ограничения на максимальную температуру изделия и решение задачи оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева с учетом этого ограничения позволяют избавиться от этих нежелательных факторов. В диссертационной работе формулируется и решается на основе альтернативного метода нелинейная задача оптимального по быстродействию управления стадией нагрева в процессе поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру поверхности заготовки.

На базе разработанной методики решения задач оптимального проектирования и управления, в диссертационном исследовании рассматривается актуальная проблема построения автоматизированной процедуры оптимизации, предусматривающей возможность интеграции численных многомерных проблемно-ориентированных моделей в оптимизационный контур.

В диссертационной работе предлагается вариант технической реализации полученного алгоритма оптимального по быстродействию управления в задаче с ограничением на максимальную температуру закаливаемого изделия.

1.5 Выводы по первой главе

1. Подробное рассмотрение физических основ технологии поверхностной индукционной закалки стальных заготовок приводит к выводу о необходимости обеспечения при индукционном нагреве равномерного распределения температуры в поверхностном слое изделия, которая исключает появление на стадии закалочного охлаждения структурной неоднородности и разброса прочностных характеристик по глубине слоя, а также позволяет снизить (или исключить) вероятность возникновения критического уровня закалочных напряжений, способных привести к недопустимым дефектам типа трещин.

2. Показано, что для обеспечения требуемого температурного профиля в упрочняемом слое при исключении локальных перегревов оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревательных установок, изменение режимов функционирования которых также не приводит к возможности достижения заданных температурных кондиций, что обуславливает необходимость постановки и решения задачи оптимизации конструктивных характеристик индуктора и его режимных параметров [6-7].

3. В общем виде сформулирована задача оптимизации индукционной нагревательной установки как объекта с распределенными параметрами. Рассмотрена базовая математическая модель процесса индукционного нагрева, задаваемая взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье, описаны типовые критерии оптимальности, а также типы управляющих воздействий и стесняющие их ограничения. Показано, что в задаче оптимального проектирования в роли неизвестных оптимизируемых параметров выступают параметры конструкции индукционного нагревателя. Рассмотрены основные виды возмущающих воздействий и дополнительных фазовых ограничений, накладываемых на результирующее температурное поле нагреваемого изделия.

4. Проведенный обзор основных методов оптимизации систем с распределенными параметрами позволил выявить их общие характеристики, основные особенности, главные преимущества и существенные недостатки, связанные с их использованием при решении задач оптимизации ОРП. Было установлено, что альтернативный метод параметрической оптимизации, обладает существенными преимуществами и позволяет получить точное решение как для изначально параметризованной задачи оптимального проектирования, так и для задачи оптимального управления после ее точной редукции к задаче математического программирования, чем и обусловлено использование альтернативного метода как теоретической основы для разработанных в диссертации методик и алгоритмов.

5. Проведенный анализ результатов исследований в области оптимизации энерготехнологических установок и систем для индукционного нагрева и термообработки металлических изделий широкого профиля свидетельствует о высоком потенциале применения методов оптимизации систем с распределенными параметрами для повышения технико-экономических показателей нагревательных установок и

совершенствования качества технологических процессов. Однако, несмотря на имеющийся существенный задел, следует отметить, что проблема оптимального проектирования и управления режимами работы индукторов, применяемых в процессах поверхностной закалки, изучена недостаточно, что подчеркивает актуальность решаемых в диссертационной работе задач.

б. Анализ степени разработанности темы исследования позволил определить содержательную постановку задачи диссертации, которая сводится к поиску оптимальной конструкции индукционной установки для поверхностной индукционной закалки, как при наличии полной информации, так и в условиях интервальной неопределенности основных параметров процесса, и алгоритмов оптимального по быстродействию управления стадией нагрева с ограничением на максимальную температуру нагреваемой детали.

2 ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАНСНОГО МЕТОДА

В данной главе рассматривается постановка задач оптимального проектирования и управления режимами индукционной нагревательной установки для реализации стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки и предлагается методика их решения на базе альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами.

2.1 Постановка задач оптимального проектирования и управления процессом поверхностной индукционной закалки

2.1.1 Постановка задачи оптимального проектирования

В настоящем разделе диссертационной работы рассматривается задача оптимального проектирования двух-виткового индуктора для стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок, рассматриваемого в качестве ОРП (рис. 2.1). Данная задача является частным случаем общей постановки задачи оптимизации индукционной нагревательной установки, приведенной в главе 1.

При формулировке общей задачи оптимизации индукционного нагревателя, приведенной в разделе 1.2, было указано, что в качестве искомым неизвестных могут выступать как конструктивные характеристики нагревателя, объединенные в вектор $\bar{P} = (p_i)$, $i = \overline{1, N}$, так и программы изменения во времени или по пространственной координате управляющего воздействия $u(\bar{x}, t)$. В рассматриваемой в данном разделе задаче оптимального проектирования в роли неизвестных оптимизируемых параметров выступают компоненты вектора \bar{P} , к которым относятся: размер витка квадратного сечения ($p_1 \times p_1$), расстояние между заготовкой и индуктором (p_2), расстояние между витками (p_3) (рис. 2.1) и ток источника питания ($p_4 = I$).

Взаимосвязанная система уравнений Максвелла и Фурье (1.2) – (1.4), (1.9) – (1.10) с краевыми условиями (1.11), описывающая в общем виде поведение электромагнитного и теплового полей в процессе индукционного нагрева, для рассматриваемой

осесимметричной нагревательной системы, показанной на рисунке 2.1, может быть записана в следующем виде: [16, 23, 79-81]:

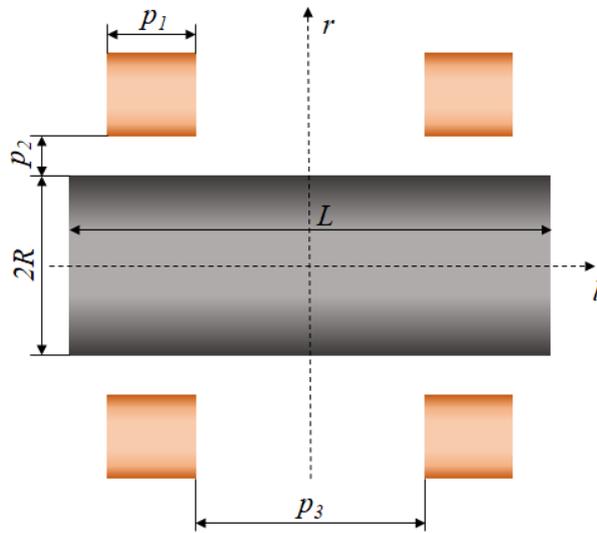


Рисунок 2.1 – Геометрия системы «индуктор-заготовка» для поверхностной закалки

Взаимосвязанная система уравнений Максвелла и Фурье (1.2) – (1.4), (1.9) – (1.10) с краевыми условиями (1.11), описывающая в общем виде поведение электромагнитного и теплового полей в процессе индукционного нагрева, для рассматриваемой осесимметричной нагревательной системы, показанной на рисунке 2.1, может быть записана в следующем виде: [16, 23, 79-81]:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma(T) \bar{E}; \quad \operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0; \quad \operatorname{div} \bar{E} = 0; \quad (2.1)$$

$$c(T) \gamma(T) \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda(T) \frac{\partial T(r, l, t)}{\partial l} \right) + \frac{1}{\sigma(T)} \left(\frac{\partial H(r, l, t)}{\partial r} \right)^2, \quad (2.2)$$

с начальными и граничными условиями:

$$T(r, l, t) = T(r, l, 0) = T_0(r, l) = T_0 = \text{const}, \quad l \in [0; L], \quad r \in [0; R] \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial H(0, l, t)}{\partial r} = 0; \quad H(R, l, t) = H_L; \quad H(r, 0, t) = H_{R1}; \quad H(r, L, t) = H_{R2}; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T(0, l, t)}{\partial r} = 0; \quad \lambda(T) \frac{\partial T(R, l, t)}{\partial r} = \alpha(T) (T(R, l, t) - T_a) \quad (2.5)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial t} = \alpha(T)(T(r, 0, t) - T_a); \quad \lambda(T) \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial t} = \alpha(T)(T(r, L, t) - T_a). \quad (2.6)$$

Здесь T - температура; $\gamma(T), c(T), \lambda(T)$ - соответственно плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности нагреваемого тела; $r \in [0; R], l \in [0; L]$ - радиальная и продольная пространственные координаты, соответственно, где R - радиус и L - длина заготовки; $\alpha(T)$ - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; T_a - температура окружающей среды.

На искомые оптимизируемые параметры накладываются ограничения вида (1.17), обусловленные геометрическими и физическими характеристиками индукционной нагревательной системы:

$$P_{1min} \leq P_1 \leq P_{1max}, P_{2min} \leq P_2 \leq P_{2max}, P_{3min} \leq P_3 \leq P_{3max}, I_{min} \leq I \leq I_{max}. \quad (2.7)$$

В главе 1 показано, что основной целью поверхностного упрочнения является получение закаленного слоя обрабатываемого изделия равномерной глубины, поэтому качество реализации первой стадии технологии индукционной закалки зависит от равномерности нагрева границы закаливаемого слоя до температур, выше критических, необходимых для образования аустенита, которые в типовых случаях нагрева стальных заготовок составляют 850-900°C.

В работе в качестве оценки точности достижения заданного равномерного распределения температуры по границе закаливаемого слоя глубиной r^* предлагается выбрать максимальную величину абсолютного отклонения температуры $T(R - r^*, l, t^0)$ вдоль этой границы в конце стадии нагрева длительностью t^0 от заданного значения $T^* = 900^\circ\text{C}$.

В соответствии с этим в качестве критерия оптимизации конструкции индуктора рассматривается минимаксный критерий, соответствующий общему представлению (1.13), обеспечивающий минимизацию данного отклонения:

$$J_1 = \max_{l \in [0, L]} |T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}) - T^*| \rightarrow \min_{\bar{P}}. \quad (2.8)$$

Таким образом, задача оптимального проектирования может быть сформулирована следующим образом: требуется найти такие значения компонентов вектора оптимизируемых параметров $\bar{P} = (p_1, p_2, p_3, I)$, стесненных ограничениями (2.7), которые обеспечивают за заданное время t^0 перевод объекта, описываемого

уравнениями (2.1)-(2.2) с граничными условиями (2.4) – (2.6), из заданного начального (2.3) в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (2.8) [79-80, 82-83].

В случае, когда информация об ОРП не является полной, и существует интервальная неопределенность относительно ряда параметров процесса, которые задаются с точностью до возможного диапазона их изменения, определяемого выражением (1.19), минимизируемый критерий (2.8) принимает вид (2.9).

$$J_2(\bar{P}) = \max_{\bar{\beta} \in \Omega} \left| \max_{t \in [0; L]} T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}, \bar{\beta}) - T^* \right| \rightarrow \min_{\bar{P}}, \quad (2.9),$$

где $\bar{\beta}$ - вектор не полностью определенных параметров.

В частном случае рассматриваемой в работе задачи с наличием интервальной неопределенности параметров процесса, к вектору $\bar{\beta}$ относятся начальная температура закаливаемой заготовки T_0 и обобщенный коэффициент теплообмена α (учитывающий потери с поверхности изделия конвекцией или излучением), которые заданы с точностью до известных интервалов их изменения $[T_{0min}; T_{0max}]$ и $[\alpha_{min}; \alpha_{max}]$ соответственно [84]. Таким образом, выражение (1.19) может быть записано в следующем виде:

$$\bar{\beta} = (T_0, \alpha); \Omega : T_{0min} \leq T_0 \leq T_{0max}, \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}. \quad (2.10)$$

Следовательно, задача оптимального проектирования индуктора для стадии нагрева поверхностной индукционной закалки в условиях интервальной неопределенности существенно усложняется и сводится к поиску таких значений искомых параметров вектора $\bar{P} = (p_1, p_2, p_3, I)$, стесненных ограничениями (2.7), которые бы за заданное время t^0 осуществляли перевод объекта, описываемого уравнениями (2.1)-(2.2) с граничными условиями (2.4) – (2.6), из заданного начального (2.3) в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (2.9) в условиях наличия интервальной неопределенности начальной температуры заготовки T_0 и коэффициента теплообмена α , заданной условиями (2.10).

Сформулированные задачи поиска оптимальных параметров конструкции индуктора как при наличии полной информации об объекте исследования, так и в условиях интервальной неопределенности его характеристик, представляют собой задачи оптимального проектирования индукционной нагревательной системы, которые

могут быть решены с помощью предлагаемой методики альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами, которая рассматривается в разделе 2.2.

2.1.2 Постановка и параметризация задачи оптимального по быстродействию управления

В главе 1 показано, что технология индукционного нагрева накладывает ряд технологических ограничений на поведение температурного поля нагреваемой заготовки, к которым преимущественно относятся ограничения на максимальную температуру по объему заготовки или максимальные растягивающие термонапряжения. Амплитуда термонапряжений, как правило, превышает, критические значения на стадии охлаждения, которая не входит в предмет рассмотрения данной диссертационной работы, поэтому ограничение на максимально допустимое растягивающее термонапряжение далее не входит в формулировку задачи.

Поскольку процесс закалки реализуется при высокой скорости нагрева до температур выше точки Кюри, существенно проблемой становится возможный перегрев поверхности заготовки, который можно избежать путем учета ограничения вида (1.18), согласно которому температура в процессе нагрева не должна превышать предельно допустимое значение $T_{дон}$:

$$T_{\max}(t) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} T(r, l, t) \leq T_{дон}; \quad 0 \leq t \leq t^0. \quad (2.11)$$

Поскольку высокая скорость нагрева является принципиальной особенностью процесса закалки, который должен быть, как указано выше, реализован при отсутствии локальных перегревов, особое значение приобретает решение задачи оптимального по быстродействию управления мощностью источников внутреннего тепловыделения при наличии фазового ограничения (2.11) на максимальную температуру поверхности обрабатываемого изделия в процессе нагрева. Критерий оптимальности для данной задачи представляет собой критерий быстродействия (1.12).

Требования к конечному температурному распределению вдоль границы закаливаемого слоя заготовки, сформулированные в задаче оптимального проектирования в виде критерия оптимизации (2.8), для рассматриваемой задачи принимают следующий вид:

$$\max_{l \in [0; L]} |T(R - r^*, l, t^0) - T^*| \leq \varepsilon_0, \quad (2.12)$$

где ε_0 - максимальная величина абсолютного отклонения температуры от заданного значения.

В качестве сосредоточенного управляющего воздействия $u(t)$ в данной задаче предлагается рассмотреть управление током источника питания индукционной нагревательной установки, на который накладывается ограничение вида (1.17).

Таким образом, рассматриваемая задача сводится к поиску оптимальной программы изменения во времени сосредоточенного управляющего воздействия $u^*(t)$, стесненного ограничениями (1.17), которое обеспечивает перевод объекта (2.1) – (2.2), (2.4) – (2.6) из заданного начального (2.3) в требуемое конечное состояние (2.12) с минимальным значением критерия оптимальности (1.12) в условиях выполнения фазового ограничения (2.11) [16, 23, 82, 83, 85].

Как показано в [16], согласно методам теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, оптимальный по критерию быстродействия процесс индукционного нагрева, в условиях действия сосредоточенных управляющих воздействий по мощности источника питания, состоит из чередующихся интервалов нагрева с максимальной мощностью $u \equiv u_{max}$ и последующего выравнивания температуры при $u \equiv u_{min} = 0$, число $N \geq 1$ которых определяется заданной точностью нагрева ε_0 и возрастает при уменьшении ε_0 , а оптимальное управление задается с точностью до этого числа N и длительностей $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$ этих интервалов (рис. 2.2).

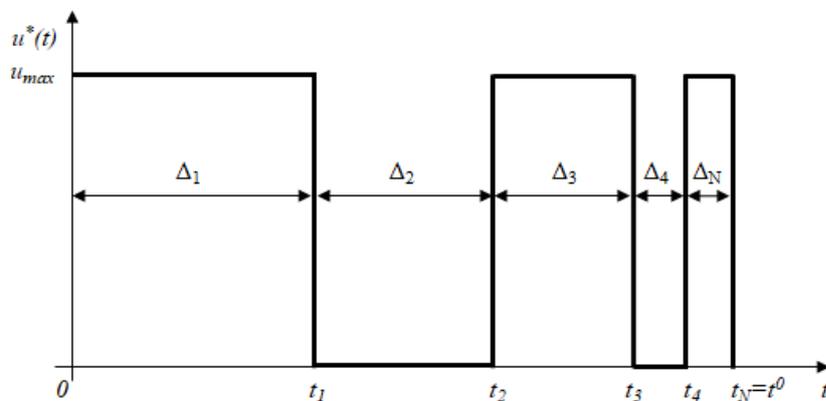


Рисунок 2.2 – Общий вид оптимального по быстродействию управления

Очевидно, что количество интервалов постоянства управляющих воздействий N и их длительности $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$ неизвестны заранее и находятся в процессе решения задачи оптимального управления. Таким образом, задача оптимального управления параметризуется, т.е. сводится к поиску параметров $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$, однозначно характеризующих управление $u^*(t)$, которое можно записать в следующем виде:

$$u^*(t) = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + (-1)^{j+1} \right], t_{j-1} < t < t_j, j = 1, 2, \dots, N. \quad (2.13)$$

В формуле (2.13) t_j - момент окончания j -ого интервала (рис. 2.2). Очевидно, что на любом нечетном интервале $u^*(t) = u_{\max}$, а на четных интервалах - $u^*(t) = 0$ в соответствии с рисунком 2.2.

При управляющем воздействии вида (2.13) температурное поле в конце процесса нагрева при $t = t^0 = t_N$ в любой точке $r = r^*, l \in [0; L]$ при заданном значении начальной температуры и известных тепловых потерях зависит только от величин $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$, т.е. $T(r^*, l, t^0)$ описывается зависимостью $T(r^*, l, \Delta)$ от переменных l и Δ , где $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ представляет собой совокупность всех длительностей интервалов постоянства управления вида (2.13).

В [86] показано, что описанные выше выводы о характере оптимального по быстродействию управления, применимые к линейным или одномерным нелинейным моделям, справедливы и по отношению к рассматриваемым в диссертационном исследовании многомерным нелинейным моделям.

Для доказательства подобного вывода [86] сначала предполагается, что оптимальное по быстродействию управление для нелинейных двумерных моделей не является релейной функцией времени, что в свою очередь означает, что на некоторых интервалах времени $(t^n, t^{n+1}) \subset [0; t_{min}^0], n = \overline{1, k}, k \geq 1$, где $0 \leq t^1 < t^2 < \dots < t^n < t^{n+1} \leq t_{min}^0$ оптимальное управление $u^*(t)$ не достигает своих предельно допустимых значений, заданных выражением (1.16). Это означает, что на данном временном промежутке управляющее воздействие удовлетворяет строгому неравенству $0 < u(t) < u_{\max}$, а на всех других интервалах процесса $u(t) = 0$ или $u(t) = u_{\max}$.

Если теперь воспользоваться конечно-разностной аппроксимацией уравнения Фурье (1.10)-(1.11) по абсолютно-устойчивой неявной схеме [1, 21, 86-87], то управление $u^*(t)$ аппроксимируется сеточной функцией $u_c^*(t)$, принимающей в пределах каждого шага по времени отличные от предельно допустимых постоянные значения $u^{(h)}$:

$$0 < u^{(h)} < u_{\max}, h = \overline{1, N} \quad (2.14)$$

на всех промежутках

$$\left[\tau^{(n)} + \frac{\tau^{(n+1)} - \tau^{(n)}}{N_n} \chi_n, \tau^{(n)} + \frac{\tau^{(n+1)} - \tau^{(n)}}{N_n} (\chi_n + 1) \right]; \chi_n = \overline{0, N_n - 1}, n = \overline{1, v} \quad (2.15)$$

и равной 0 или u_{\max} на всех остальных участках процесса.

Пусть

$$T_{ij}^k = f_{ij}^k(u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(N)}), i, j, k = \overline{1, m}, \quad (2.16)$$

есть решение соответствующей разностной системы уравнений на некоторых $m < N$ равномерно распределенных на всем протяжении процесса временных слоях $t = t_k, k = \overline{1, m}$, включая конечный момент времени $t_m = t_{\min}^0$, относительно $N = m^3$ значений температур T_{ij}^k в узлах (r_i, l_j, t_k) сетки, в том числе результирующего состояния $T_{ij}^m, i, j = \overline{1, m}$ на слое $t_m = t_{\min}^0$, которые задаются непрерывно дифференцируемыми функциями f_{ij}^k своих аргументов. Соотношения (2.16), в свою очередь, можно рассматривать для N заданных величин T_{ij}^k как систему N уравнений относительно N неизвестных $u^{(h)}, h = \overline{1, N}$.

Пусть далее вычисляемый на решениях этой системы якобиан

$$D = \det \left[\frac{\partial f_{ij}^k}{\partial u^{(h)}} \right]; i, j, k = \overline{1, m}; h = \overline{1, N}; N = m^3 \quad (2.17)$$

всегда отличен от нуля при любом достаточно большом m .

Тогда, согласно теоремам о неявных функциях, в окрестности значений $u^{(h)}$ в (2.16), образующих сеточную функцию $u_c^*(t)$, существует малая вариация $\delta \tilde{u} = (\delta \tilde{u}^{(h)}), h = \overline{1, N}$, не стесняемая по знаку ограничением вида (1.16) в силу строгих неравенств (2.14), которой соответствуют приращения конечного состояния

$\delta T_* = (\delta T_{ij}^m), i, j = \overline{1, m}$, обеспечивающие за то же время t_{min}^0 выполнение условия попадания в конечное состояние во всех узлах $(r_i, l_j, t_k), k, i, j = \overline{1, m}$.

Отсюда на основании непрерывности зависимостей значений температуры T_{ij}^m от t_m получаем, что при достаточно большом m варьированному сеточному управлению $\delta \tilde{u}_c^*(t)$, принимающему на промежутках (2.15) постоянные значения $u^{(h)} + \delta \tilde{u}^{(h)}, h = \overline{1, N}$, отвечают в соответствии с соотношениями (2.16) варьированные величины $\tilde{T}_{ij}^m, i, j = \overline{1, m}$ на некотором временном слое $t = \tilde{t}_m < t_{min}^0$, принадлежащие заданному целевому множеству конечных состояний ОРП. Таким образом, управление $u_c^*(t)$ в рассматриваемых условиях не оптимально по быстродействию для конечно-разностной модели объекта. Поскольку $u_c^*(t)$ поточечно сходится к $u^*(t)$ при $N \rightarrow \infty$, этот вывод сохраняется вопреки исходному предположению, и для управления $u^*(t)$ при точном описании ОРП системой уравнений (1.10), (1.11) [86].

Таким образом, для сформулированной нелинейной двумерной задачи оптимального управления остается справедливым вывод о том, что оптимальное по быстродействию управление $u^*(t)$ имеет вид кусочно-постоянной функции (2.13), заданной с точностью до вектора $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ ее неизвестных параметров.

Тогда при параметрическом представлении управляющего воздействия в виде (2.13), условие достижения заданных температурных кондиций (2.12) может быть записано в следующем виде:

$$\Phi(\Delta) = \max_{l \in [0; L]} |T(R - r^*, l, \Delta) - T^*| \leq \varepsilon_0, \quad (2.18)$$

а ограничение на максимально допустимую температуру обрабатываемой заготовки (2.11), в свою очередь, примет следующую форму:

$$T_{\max}(\Delta) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} T(r, l, \Delta) \leq T_{don}. \quad (2.19)$$

Поскольку задача оптимального по быстродействию управления заключается в достижении требуемого температурного состояния нагреваемых изделий (2.18) за минимально возможное время, которое, очевидно, представляет собой сумму

интервалов нагрева и выравнивания температуры $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$, то эта сумма и будет выступать в роли критерия оптимальности:

$$I(\Delta) = \sum_{i=1}^N \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta} \quad (2.20)$$

В итоге проблема сводится к задаче математического программирования на минимум целевой функции (2.20) N переменных Δ_i с заданным ограничением на множество допустимых значений Δ_i в форме неравенств (2.18) и ограничением на максимально допустимую температуру нагреваемого изделия (2.19) [16, 23]. Поскольку условия (2.18) и (2.19) накладываются на бесконечное число точек рассматриваемого двумерного пространства, то это означает наличие бесконечного числа таких ограничений, а задача оптимального управления, в свою очередь, представляет собой задачу полубесконечной оптимизации.

Сформулированная задача математического программирования (2.18)-(2.20), к которой была редуцирована исходная задача оптимального по быстродействию управления, так же может быть решена с помощью алгоритма, основанного на использовании альтернансного метода параметрической оптимизации, который будет рассмотрен в разделе 2.2.2.

2.2 Методика решения задач параметрической оптимизации конструкции индуктора и алгоритмов управления процессом поверхностной индукционной закалки

В настоящем разделе рассматривается разработанная на базе альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами методика решения задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностной закалки стальных заготовок, позволяющая обеспечить максимальную точность нагрева поверхностного слоя упрочняемой детали, как в условиях наличия полной информации, так и при интервальной неопределенности параметров, характеризующих стадию индукционного нагрева. Представлен разработанный алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева в процессе поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру поверхности заготовки, который позволяет

получить максимальную скорость нагрева поверхностного слоя без локальных перегревов по объему упрочняемой детали.

2.2.1 Методика решения задачи оптимального проектирования

Предлагаемая методика решения сформулированной в разделе 2.1.1 задачи оптимального проектирования основана на использовании альтернансного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами [16, 23, 51]. Как показано в главе 1, данный метод опирается на установленные универсальные свойства пространственных распределений температуры по объему заготовки в конце оптимальных процессов индукционного нагрева металла, подобные известным в математике свойствам наилучших приближений заданных функций к нулю. На этой основе производится процедура точной редукции исходной задачи оптимизации к решению трансцендентных систем уравнений, замкнутых относительно всех искомым параметров.

В диссертации предлагается распространить методику применения альтернансного метода для решения параметризованных задач оптимального управления [16, 23, 51] на решение задач оптимального проектирования индукционных нагревателей следующим образом.

Согласно теории альтернансного метода [16, с. 75], можно доказать, что, если оптимальный по критерию (2.8) процесс периодического индукционного нагрева с управлением током источника питания характеризуется совокупностью N неизвестных оптимизируемых параметров, а величина $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ представляет собой минимальное из возможных отклонений ε_0 температуры в конце процесса нагрева от заданного значения, достижимых в классе задач с N неизвестными параметрами, то отклонения $\varepsilon_{\min}^{(j)}$, $j = \overline{1, N}$ формируют убывающий ряд неравенств:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \varepsilon_{\min}^{(3)} \dots > \varepsilon_{\min}^{(N)} > \varepsilon_{\min}^{(N+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(N^*)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0. \quad (2.21)$$

Здесь ε_{\inf} - предельно достижимая точность нагрева в задачах с любым числом оптимизируемых параметров (нижняя граница достижимых значений ε_0).

Поскольку точное попадание в требуемое конечное температурное состояние, соответствующее $\varepsilon_{\inf} = 0$, невозможно, то очевидно, что выполняется условие $\varepsilon_{\inf} \leq \varepsilon_{\min}^{(N)}$.

Доказано [51], что заданное число N неизвестных параметров процесса однозначным образом связано с неизвестным значением ε_0 следующим правилом:

$$N = S \text{ для всех } \varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(S)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(S-1)}, \quad (2.22)$$

определяющим место ε_0 в последовательности неравенств (2.19) в зависимости от N .

Оптимальным значениям параметров вектора $\bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, \dots, p_N^0)$, являющихся решением сформулированной в разделе 2.1.1 задачи оптимального проектирования с полной информацией об объекте, отвечает пространственное распределение температур $T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$, которое должно соответствовать минимальному значению критерия оптимальности (2.8). Согласно альтернансному методу, основное свойство результирующего температурного распределения $T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ состоит в том, что число K точек l_j^0 по объему нагреваемого тела (в данном случае вдоль продольного сечения обрабатываемой заготовки при $r = R - r^*$), в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения конечной температуры $T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ от требуемого значения T^* , равные ε_0 , всегда оказывается не меньше числа N искомым оптимизируемых параметров процесса [16-18, 51]. Другими словами, если решением задачи оптимизации являются K параметров, однозначным образом характеризующих оптимальный процесс нагрева, то при $t = t^0$ всегда найдутся такие K точек $l_j^0, j = \overline{1, K}$ $0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L$ на отрезке $l \in [0; L]$, для которых выполняются следующие неравенства:

$$T(R - r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = \varepsilon_0; \quad j = \overline{1, K}; \quad \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, \dots, p_N^0) \quad (2.23)$$

В (2.23), согласно (2.22), величина ε_0 определяется следующими выражениями:

$$\varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)}; \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)}. \quad (2.25)$$

Согласно соотношениям (2.24) и (2.25), заданная в (2.23) точность нагрева ε_0 может либо не достигать предельно возможной $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ величины для задач с N оптимизируемыми параметрами (в случае выполнения условия (2.24)), либо быть равной этому значению (в случае выполнения условия (2.25)).

Случай (2.24) соответствует задаче, в которой величина ε_0 оказывается заранее заданной, а искомыми N параметрами, как уже было отмечено ранее, будут являться компоненты вектора оптимизируемых параметров $\bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, \dots, p_N^0)$. Следовательно, в выражении (2.23) число точек с максимальным абсолютным отклонением температуры от требуемого значения K будет совпадать с числом неизвестных параметров N в условиях (2.24).

В случае, когда оказывается справедливым соотношение (2.25), значение предельно достижимой точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ заранее неизвестно. Очевидно, что в этой ситуации указанная величина и конструктивные параметры вектора $\bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, \dots, p_N^0)$ являются искомыми неизвестными, обеспечивающими минимизацию критерия (2.8), общее число которых равно $N+1$. Таким образом, в данном случае в выражении (2.23) должно выполняться равенство $K=N+1$.

При этом детальный анализ результирующего температурного поля [17, 51] показывает, что максимально допустимые отклонения температуры от заданной $T(R - r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^*$ оказываются знакопередающимися в точках $l_j^0, j = \overline{1, K}$, где $0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L$, т.е. обладают альтернансным свойством.

Таким образом, свойства результирующего температурного распределения по границе закаливаемого слоя с учетом соотношений (2.23) – (2.25) и указанных выше утверждений, могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{cases} T(R - r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, j = \overline{1, K}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0), \psi = \pm 1; \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L; K = \begin{cases} N, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)} \\ N + 1, \text{ если } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)} \end{cases}, \end{cases} \quad (2.26)$$

где множитель $(-1)^j$ обеспечивает знакопередавание температурных отклонений в точках с координатами l_j^0 , а коэффициент $\psi = 1$ или $\psi = -1$ определяет два возможных варианта по знаку этих отклонений в каждой из таких точек.

Подобные свойства результирующего температурного распределения по границе закаливаемого слоя обрабатываемой детали (2.26) существенно сокращают число возможных вариантов по форме кривой $T(R - r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0)$, однако, однозначно эта форма может быть установлена только с учетом дополнительной информации о

расположении точек экстремума на рассматриваемом отрезке $l \in [0; L]$, которая определяется специфическими особенностями рассматриваемого процесса нагрева.

Кроме того, в [16, 51] показано, что координаты некоторых $K_1 < K$ точек l_j^0 , в которых достигаются предельные отклонения температуры от заданной, неизвестны заранее и должны находиться в результате решения рассматриваемой задачи оптимизации. В этом случае, система соотношений (2.26) должна быть дополнена

необходимыми условиями экстремума $\frac{\partial T(R - r^*, l, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0$, которые выполняются в этих точках с неизвестными координатами $l_m^0, m = \overline{1, K_1 < K}$. В этом случае выражения (2.26) могут быть записаны в форме следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} T(R - r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, j = \overline{1, K}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0), \psi = \pm 1; \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L; K = \begin{cases} N, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)} \\ N + 1, \text{ если } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_m^0, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m = \overline{1, K_1 < K}. \end{cases} \quad (2.27)$$

Система уравнений (2.27) оказывается замкнутой относительно всех неизвестных, включая неизвестные параметры $p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0$, координаты $l_j^0, j = \overline{1, K}$ и значение $\varepsilon_{\min}^{(N)}$ в условиях (2.25), поэтому её решение является решением рассматриваемой задачи оптимального проектирования.

Таким образом, методика решения рассматриваемой задачи с полной информацией об объекте может быть описана следующим образом.

1. На первом этапе решается задача в предположении, что максимально достижимая точность нагрева оказывается равной $\varepsilon_{\min}^{(1)}$, которая достигается при наличии одного неизвестного параметра вектора \bar{P} при $N=1$.

Учитывая, что форма кривой температурного распределения по границе закаливаемого слоя $T(R - r^*, l, \bar{P}^0)$ известна и, в соответствии с рисунке 2.3, предполагает наличие одного экстремума и двух точек максимального отклонения температуры от заданной, получаем для точности нагрева $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ систему уравнений вида (2.28). Данная система оказывается замкнутой и может быть решена относительно

всех неизвестных параметров процесса, к которым в этом случае относятся p_1^0 , l_2^0 и $\varepsilon_{\min}^{(1)}$.

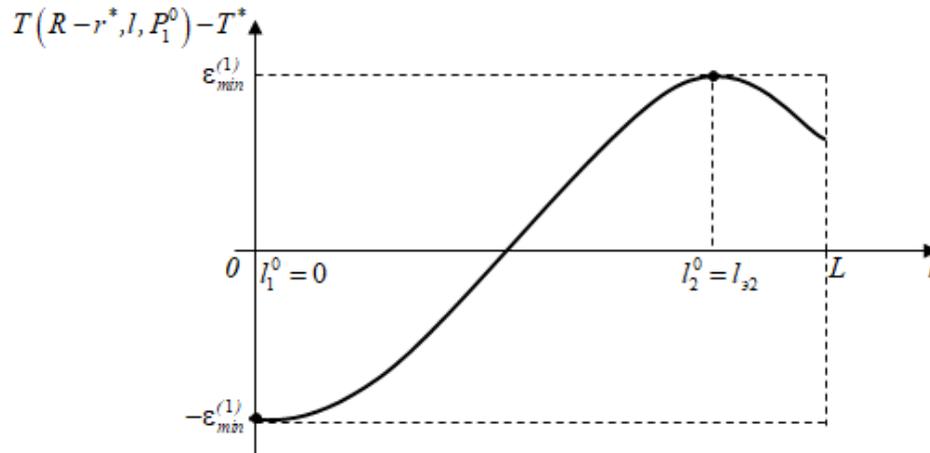


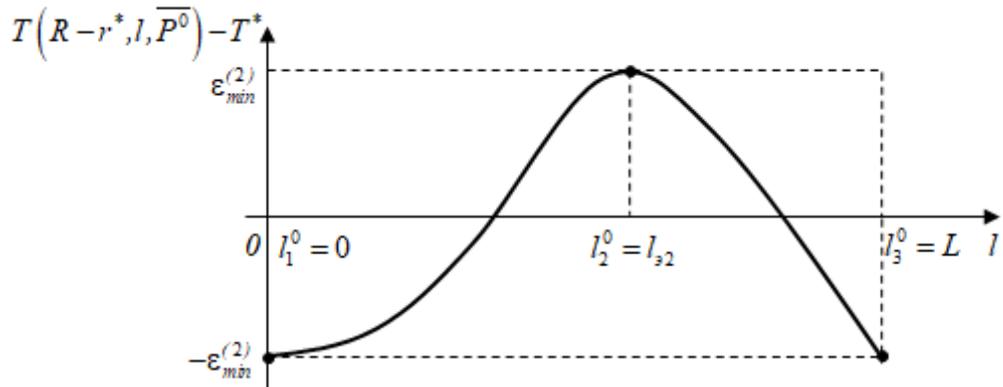
Рисунок 2.3 – Форма кривой $T(R-r^*, l, p_1^0)$ результирующего температурного распределения по границе закаливаемого слоя при точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(1)}$

$$\begin{cases} T(R-r^*, 0, p_1^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ T(R-r^*, l_2^0, p_1^0) - T^* = \varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_2^0, p_1^0)}{\partial l} = 0. \end{cases} \quad (2.28)$$

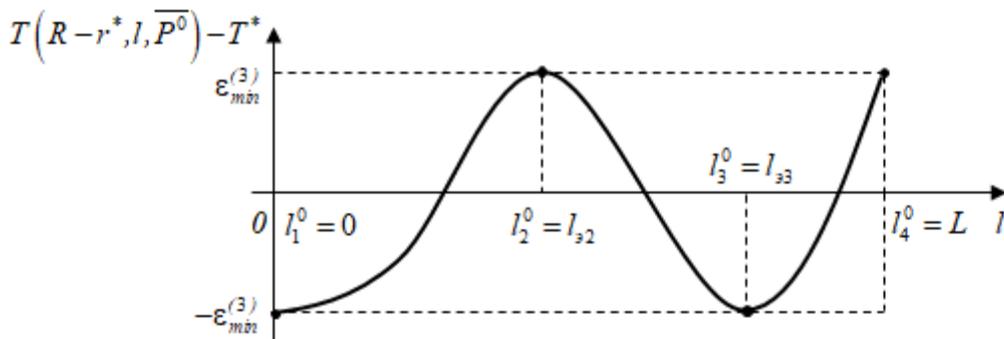
2. Если вектор \bar{P} включает $N \geq 2$ конструктивных параметров, необходимо перейти к решению задачи для нового значения точности нагрева $\varepsilon < \varepsilon_{\min}^{(1)}$. Для этого решают последовательность задач для ряда значений $\varepsilon = \varepsilon'$, уменьшающихся с малым шагом от $\varepsilon_{\min}^{(1)}$. При этом для каждого значения точности нагрева необходимо задаваться формой температурного распределения, соответствующей данному значению. Типовые формы распределения температуры по границе закаливаемого слоя в конце оптимального процесса для точности нагрева $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(2)}, \bar{\varepsilon}_{\min}^{(3)}, \bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$ показаны на рисунке 2.4. Системы уравнений для указанных значений точности записываются в соответствии с (2.27).

3. В частном случае задачи оптимизации конструкции индукционной нагревательной установки, сформулированной в разделе 2.1.1, вектор неизвестных оптимизируемых параметров \bar{P} состоит из четырех компонент, то есть $N=4$, и, следовательно, температурное поле в конце процесса нагрева имеет $K=5$ точек с

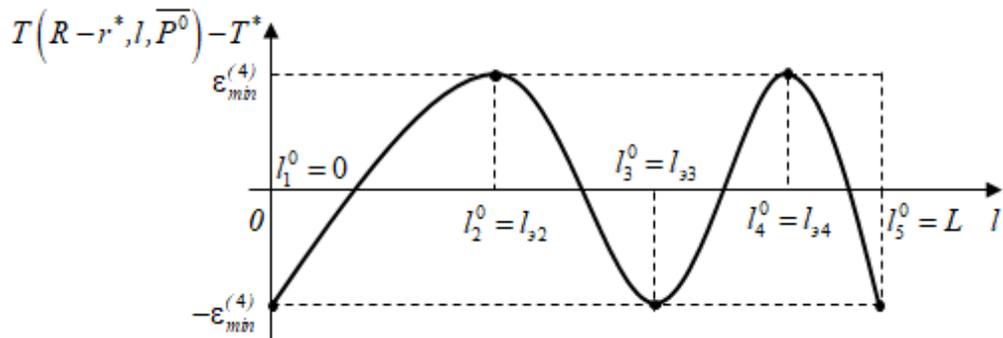
максимальным абсолютным отклонением температуры от заданной согласно рисунку 2.4в.



а)



б)



в)

а – для точности $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(2)}$; б - для точности $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(3)}$; в - для точности $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$

Рисунок 2.4 – Формы конечных температурных распределений для предельно достижимых значений точности нагрева

Согласно рисунку 2.4в, максимумы температуры при нагреве в системе, показанной на рисунке 2.1, достигаются в точках рассматриваемого отрезка $r = R - r^*$; $l \in [0; L]$, в которых значение плотности тока максимально, а минимумы, в свою очередь, соответствуют минимальной плотности тока и максимальным тепловым потерям с торцов заготовки.

Таким образом, система уравнений альтернансного метода (2.27) для данного случая принимает вид (2.29) [79-83].

Представленная методика может быть использована при решении задач оптимального проектирования нагревательной установки при наличии полной информации об исследуемом объекте. Далее будет рассмотрена методика решения задачи оптимального проектирования с интервальной неопределенностью основных параметров процесса, которые в сформулированной в разделе 2.1.1 задаче представляют собой начальную температуру заготовки T_0 и коэффициент теплообмена с поверхности α .

$$\begin{cases} T(R-r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(4)}, j = \overline{1,5}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, p_4^0); \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < l_3^0 < l_4^0 < l_5^0 \leq L; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_m^0, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m = \overline{2,4}. \end{cases} \quad (2.29)$$

Пусть, согласно (2.10), задан векторный параметр $\bar{\beta} = (T_0, \alpha)$, который обозначает совокупность любых фиксированных значений $T_0 \in [T_{0min}, T_{0max}]$, $\alpha \in [\alpha_{min}, \alpha_{max}]$.

Данная задача по сравнению с задачей с полной информацией о стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки осложняется тем, что необходимо рассматривать максимумы абсолютных температурных отклонений на множестве различных возможных реализаций допустимых значений вектора $\bar{\beta}$ вместо пространственной координаты l .

Аналогично [16, 23] можно сделать вывод, что основные свойства конечного температурного состояния, записанные в виде системы уравнений (2.27), распространяются и на рассматриваемую задачу с не полностью определенными характеристиками исследуемого объекта. Специфической особенностью данной задачи является то, что $T(R-r^*, l, \bar{\beta}, \bar{P})$ для каждого \bar{P} представляет собой не просто конечное температурное распределение, а совокупность таких распределений температуры по пространственной координате l для всех возможных реализаций неопределенных факторов T_0 и α .

Вышесказанное означает, что температурным минимумам и максимумам соответствуют разные комбинации реализаций возможных значений неопределенных факторов $\bar{\beta}_{\min}, \bar{\beta}_{\max}$, соответственно.

Ввиду того, что значения T_0 и α в $\bar{\beta}_{\min}, \bar{\beta}_{\max}$ для минимумов и максимумов заранее неизвестны, возникает проблема их поиска, а также установления формы температурных распределений $T(R-r^*, l, \bar{\beta}, \bar{P})$ на множестве значений $\bar{\beta}$ с целью дальнейшего составления расчетных систем уравнений альтернансного метода. Данная проблема относительно просто решается для наиболее типичных ситуаций, когда форма кривой в задаче с полным объемом информации $T(R-r^*, l, \bar{P})$ известна [16-18, 23].

Пусть для данной задачи максимально достижимая точность нагрева обозначается через величину $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)}, j = \overline{1, N^*}$. Тогда в ряду неравенств (2.21) каждая из величин $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)}$ будет определяться с помощью следующего выражения:

$$\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)} = \min_P \left[\max_{\bar{\beta}} \left| T(R-r^*, l, \bar{\beta}, \bar{P}) - T^* \right| \right], l \in [0; L]. \quad (2.30)$$

В данном случае $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)}$ означает максимальную точность нагрева заготовки, достижимую в классе задач с j оптимизируемыми параметрами на всем множестве допустимых реализаций значений начальной температуры и коэффициента тепловых потерь.

Вышеизложенное позволяет записать следующую систему уравнений, аналогичную системе (2.27) в задаче с полной информацией об объекте.

$$\left\{ \begin{array}{l} T(R-r^*, l_a^0, t^0, \bar{\beta}_{\min}, \bar{P}^0) - T^* = -\bar{\varepsilon}_0, a = 1, 3, 5, \dots, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0); \\ T(R-r^*, l_b^0, t^0, \bar{\beta}_{\max}, \bar{P}^0) - T^* = \bar{\varepsilon}_0, b = 2, 4, 6, \dots, a + b = K; \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L; K = \begin{cases} N, & \text{если } \bar{\varepsilon}_{\min}^{(N)} < \bar{\varepsilon}_0 < \bar{\varepsilon}_{\min}^{(N-1)} \\ N + 1, & \text{если } \bar{\varepsilon}_0 = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_m^0, t^0, \bar{\beta}_{\min}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_p^0, t^0, \bar{\beta}_{\max}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m + p = K_1 < K. \end{array} \right. \quad (2.31)$$

Таким образом, методика решения рассматриваемой задачи с интервальной неопределенностью характеристик может быть описана следующим образом.

1. На первом этапе решается задача в предположении, что максимально достижимая точность нагрева оказывается равной $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}$. Данное значение достигается при $N=1$, то есть, как было показано ранее, при наличии одного неизвестного параметра вектора \bar{P} .

Форма кривой температурного распределения по границе закаливаемого слоя $T(R-r^*, l, p_1^0)$ для всех возможных комбинаций значений T_0 и α для наиболее типового случая, когда тепловые потери с поверхности нагреваемого изделия довольно малы, показана на рис. 2.3.

Учитывая, что форма температурного распределения $T(R-r^*, l, \bar{P}^0)$ известна и имеет вид, показанный на рисунке 2.3, то это означает, что известны и координаты точек с максимальным отклонением $l_1^0 = 0$ и $l_2^0 = l_{s,2}$ для любой фиксированной пары значений T_0 и α . Остается лишь определить неизвестные значения T_{01}^0, α_1^0 и T_{02}^0, α_2^0 , а следовательно и кривые на которых достигаются температурные экстремумы в точках $l_1^0 = 0$ и $l_2^0 = l_{s,2}$ (рис. 2.5).

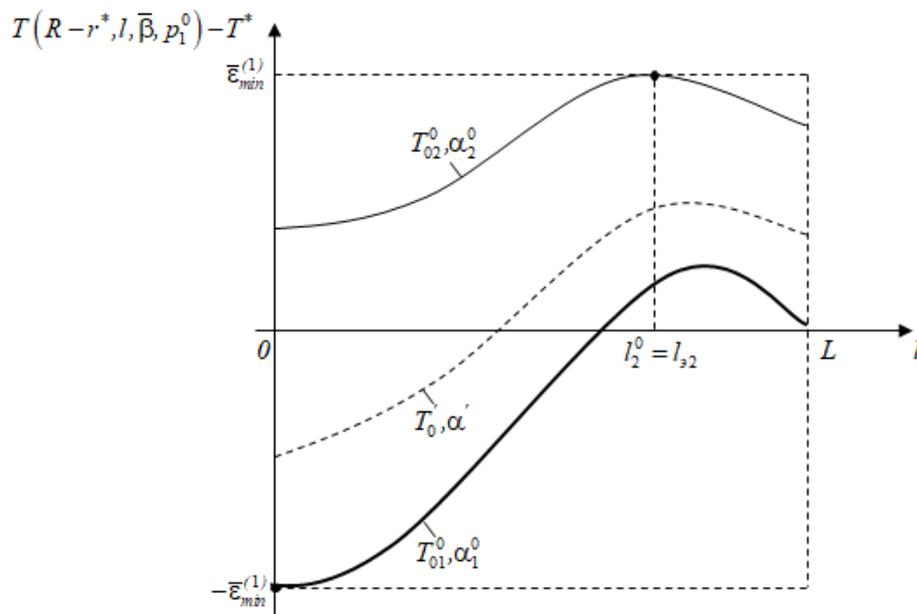


Рисунок 2.5 – Температурное распределение по границе закаливаемого слоя в конце оптимального по точности нагрева при наличии неполной информации о характеристиках объекта при $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}$

Как видно из представленного графика, фиксированные значения T_{01}^0, α_1^0 определяют верхнюю, а значения T_{02}^0, α_2^0 - нижнюю температурную кривую соответственно. Именно между этими условными границами и будут лежать остальные кривые температурных распределений, которые соответствуют всем другим, отличным от T_{01}^0, α_1^0 и T_{02}^0, α_2^0 , значениям, удовлетворяющим ограничениям (2.10).

Очевидно, что при одинаковой длительности оптимального процесса и значениях неизвестных параметров вектора \bar{P} , для всей совокупности объектов максимум температуры в точке $l_2^0 = l_{s2}$ достигается при максимально возможной начальной температуре заготовки и минимально возможном коэффициенте тепловых потерь.

Минимуму температуры в точке $l_1^0 = 0$, напротив, соответствуют минимальная начальная температура и максимальный коэффициент тепловых потерь.

Таким образом, для точности нагрева $\varepsilon = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}$ получаем следующую систему уравнений (2.32). Данная система оказывается замкнутой и может быть решена относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым относятся p_1^0, l_2^0 и $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}$.

$$\begin{cases} T(R - r^*, 0, T_{0\min}, \alpha_{\max}, p_1^0) - T^* = -\bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}; \\ T(R - r^*, l_2^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, p_1^0) - T^* = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_2^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, p_1^0)}{\partial l} = 0. \end{cases} \quad (2.32)$$

2. Если вектор конструктивных параметров \bar{P} имеет более одной компоненты, то необходимо перейти к решению задачи для нового значения точности нагрева $\varepsilon < \bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}$. Для этого, аналогично задаче с полной информацией об объекте, решают последовательность задач для ряда значений $\varepsilon = \varepsilon'$, уменьшающихся с малым шагом от $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(1)}$. При этом для каждого значения точности нагрева необходимо задаваться формой температурного распределения, соответствующей данному значению (рис. 2.4). Системы уравнений для указанных значений точности записываются в соответствии с (2.31).

3. Ввиду того, что в данном диссертационном исследовании, рассматривается вектор \bar{P} , содержащий четыре неизвестных конструктивных параметра индукционной

нагревательной установки, оказывается, что конечное температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя толщиной r^* имеет пять точек с максимальным отклонением температуры от заданного значения (рис. 2.4в).

Очевидно, что данному температурному распределению соответствует максимально достижимая точность нагрева $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$. Вновь принимая во внимание тот факт, что максимальная температура в конце оптимального процесса достигается при минимальном коэффициенте потерь и максимальной начальной температуре, а минимумы – при максимальном коэффициенте потерь и минимальной начальной температуре, согласно (2.31) для данного случая можно составить расчетную систему уравнений альтернансного метода (2.33) [84].

$$\left\{ \begin{array}{l} T(R - r^*, l_i^0, T_{0\min}, \alpha_{\max}, \bar{P}^0) - T^* = -\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}, i = 1, 3, 5; \\ T(R - r^*, l_j^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, \bar{P}^0) - T^* = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}, j = 2, 4; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_3^0, T_{0\min}, \alpha_{\max}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0, 0 = l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_5^0 = L; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_k^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0, k = \overline{2, 4}. \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Система (2.33), состоящая из восьми уравнений, вновь оказывается замкнутой относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым относятся: четыре компонента вектора оптимизируемых конструктивных параметров \bar{P}^0 , три координаты точек с максимальным отклонением температуры от заданной l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значение точности нагрева $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$, и, следовательно, может быть решена относительно рассматриваемых неизвестных.

2.2.2 Алгоритм решения задачи оптимального по быстрдействию управления при ограничении на максимальную температуру заготовки

Как указано в главе 1, основная цель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки заключается в получении максимально равномерного температурного поля в закаливаемом поверхностном слое обрабатываемого изделия за короткое время нагрева. Высокоинтенсивный нагрев возможен только при использовании больших токов высокой частоты, что весьма часто приводит к

перегреванию поверхности, оплавлению и выбраковке деталей. Для исключения этого нежелательного эффекта на этапе формулировки задачи оптимального управления в разделе 2.1.2 вводится дополнительное фазовое ограничение на максимальную температуру нагреваемой заготовки вида (2.11).

Если ограничение (2.11) не нарушается при оптимальном управляющем воздействии вида (2.13), то управляющее воздействие (2.13) остается оптимальным и в задаче с ограничением на максимальную температуру. Тогда задача решается на основе известной процедуры альтернансного метода для задачи оптимального по быстродействию управления без фазового ограничения на максимальную температуру заготовки.

Распространяя альтернансные свойства оптимальных температурных распределений по объему нагреваемых заготовок на температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя, можно записать следующую систему нелинейных трансцендентных уравнений, подобную (2.27), в которой в качестве неизвестных оптимизируемых параметров будут выступать длительности интервалов постоянства $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ управления (2.13), а их число N определяется установленной формой конечного распределения температуры.

$$\left\{ \begin{array}{l} T(R - r^*, l_j^0, t^0, \overline{\Delta^0}) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, \quad j = \overline{1, K}, \overline{\Delta^0} = (\Delta_1^0, \Delta_2^0, \dots, \Delta_N^0), \psi = \pm 1; \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L; \quad K = \begin{cases} N, & \text{если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)} \\ N + 1, & \text{если } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_m^0, t^0, \overline{\Delta^0})}{\partial l} = 0; \quad m = \overline{1, K_1} < K. \end{array} \right. \quad (2.34)$$

При отсутствии нарушения ограничения (2.11), управление вида (2.13) с параметрами $\overline{\Delta^0}$, оптимальные значения которых являются решениями системы (2.34), представляет собой решение задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева технологии поверхностной закалки с учетом ограничения на максимальную температуру (2.11). Однако в большинстве реальных ситуаций из-за превышения величины температурного максимума на некотором временном интервале процесса это условие не выполняется (рис. 2.6).

Очевидно, что на участке от t_1^1 до t_1^2 наблюдается превышение допустимого значения максимальной температуры нагреваемой заготовки, поэтому необходимо отыскать такое управляющее воздействие, при котором температура на этом участке не будет превышать допустимого значения $T_{дон}$. Как показано в [16, 85], если на этом участке будет выполняться условие $T_{max}(t) = T_{дон}$, то время нагрева в оптимальном процессе с введенным фазовым ограничением (2.11) будет минимальным из всех ВОЗМОЖНЫХ.

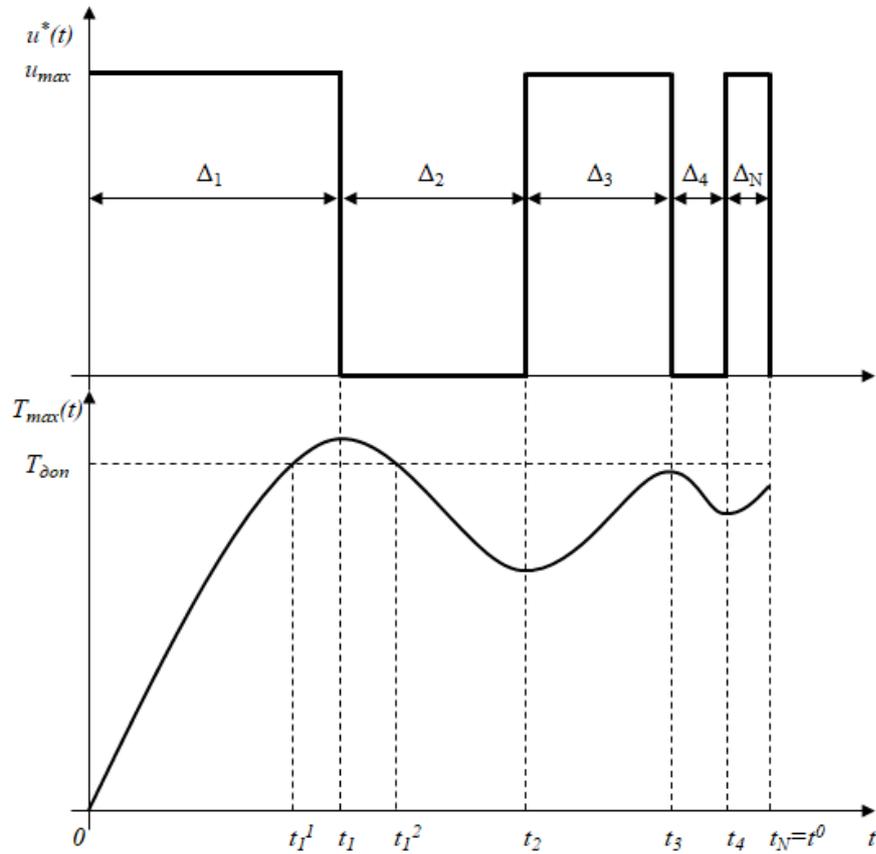


Рисунок 2.6 – Изменение управляющего воздействия $u^*(t)$ и максимальной температуры $T_{max}(t)$ в процессе индукционного нагрева

При этом вид оптимального управления для остальных интервалов остается неизменным. Тогда алгоритм оптимального по быстродействию управления (2.13) в условиях ограничения (2.11) принимает следующий вид:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{max}, t \in (0, t_T); \\ u^T(t), t \in [t_T; \Delta_1^0]; \\ \frac{u_{max}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], \Delta_{j-1}^0 \leq t < \Delta_j^0, j = \overline{2, N}. \end{cases} \quad (2.35)$$

Здесь t_T - момент времени, когда максимальная температура в процессе нагрева T_{\max} становится равной максимально допустимому значению $T_{\text{дон}}$; u^T - управляющее воздействие на участке движения по ограничению.

Таким образом, аналогично задаче оптимального по быстродействию управления без учета ограничения для данной задачи поиск оптимального управления вида (2.35) сводится к определению количества N и длительностей интервалов постоянства $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ функции $u^*(t)$, а также длительности интервала движения по ограничению и характера изменения управляющего воздействия $u^T(t)$ на этом интервале.

Алгоритм численного решения подобной задачи можно представить следующим образом.

1. На первом этапе решается задача оптимального по быстродействию управления без учёта технологических ограничений и устанавливается конкретная форма управляющего воздействия вида (2.35). В рассматриваемом частном случае данная задача сформулирована применительно к стадии нагрева поверхностной индукционной заковки, в течение которой обрабатываемая заготовка непрерывно нагревается в индукторе при максимальном токе источника питания из заданного диапазона его допустимых значений (2.7). Последующие чередующиеся интервалы нагрева и выравнивания температуры в (2.35) для данной стадии отсутствуют, поэтому управляющее воздействие вместо (2.35) может быть записано в следующем виде:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, t \in (0, t_T); \\ u^T(t), t \in [t_T; \Delta_1^0]. \end{cases} \quad (2.36)$$

2. На втором этапе устанавливается конкретный вид управляющего воздействия на особом участке движения по ограничению $u^T(t)$. При сравнительно небольшой длительности стадии нагрева можно пренебречь смещением температурного максимума в течение этой стадии от поверхности к центру, и представить рассматриваемый участок $u^T(t)$ простым экспоненциальным законом изменения во времени управления, стабилизирующего максимальную температуру на заданном уровне в точке l_{\max} [16, 23]:

$$u^T(t) \cong a + be^{-c(t-t_T)}; t \in [t_T; \Delta_1^0] \quad (2.37)$$

В этом случае алгоритм оптимального управления примет форму, показанную на рисунке 2.7.

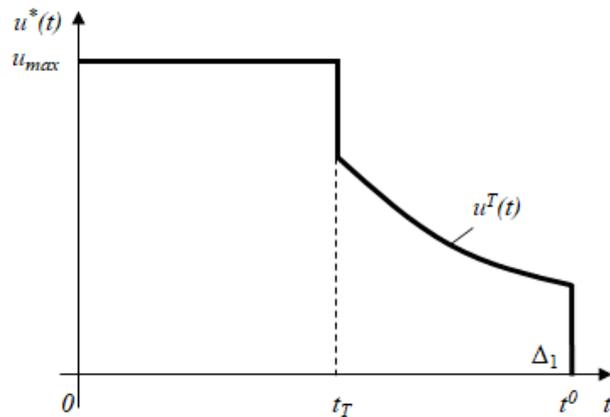


Рисунок 2.7 – Форма оптимального по быстродействию алгоритма управления

3. В случае, когда длительность нагрева существенна, то найденное подобным образом управление на особом участке, стабилизирующее температуру в точке l_{max} , уже не обеспечивает стабилизацию максимума температуры по объему нагреваемой заготовки на допустимом уровне $T_{дон}$. В этом случае используется аппроксимация искомого управляющего воздействия $u^T(t)$ кусочно-постоянной функцией времени (рис. 2.8).

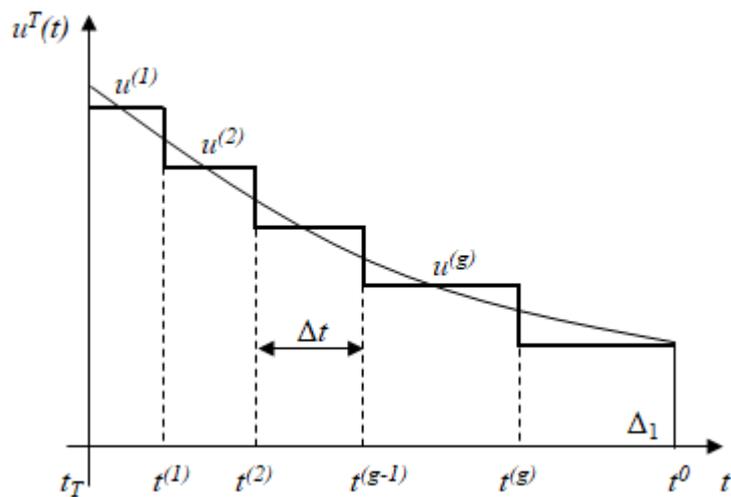


Рисунок 2.8 – Кусочно-постоянная аппроксимация управления $u^T(t)$

Подобная аппроксимация управления на особом участке с помощью представленной функции сводится к итерационной процедуре поиска на каждом

временном шаге Δt значения управляющего воздействия $u^{(g)}, g = \overline{1, J}$, при котором выполняется следующее условие:

$$T_{\max}(t) = T_{\text{дон}} \quad (2.38)$$

в моменты времени $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(J)}$, где $t^{(g)} = t_T + g \cdot \Delta t$ [16, 85]. При этом необходимая точность аппроксимации определяется выбором достаточно большого числа J шагов изменения управляющего воздействия и достаточно малой длительности каждого шага по времени Δt .

4. На последнем этапе необходимо определить время окончания стадии нагрева рассматриваемого процесса поверхностной индукционной закалки для данной задачи оптимального управления. Поскольку главной целью первой стадии поверхностного упрочнения является нагрев закаливаемого слоя заготовки до требуемой температуры T^* , то время окончания этой стадии $t^0 = \Delta_1^0$ соответствует моменту, когда средняя температура в упрочняемом слое достигает заданного значения T^* .

Таким образом, оптимальное по быстродействию управление в задаче с ограничением на максимальную температуру заготовки (2.35) примет следующую форму, представленную на рисунке 2.9.

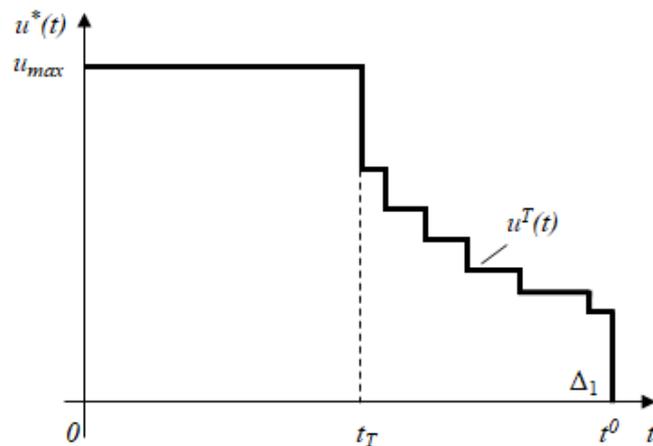


Рисунок 2.9– Форма оптимального по быстродействию алгоритма управления при аппроксимации $u^T(t)$ кусочно-постоянной функцией

Стоит отдельно отметить, что температуры $T(R - r^*, l_j^0, \overline{P^0})$, $j = \overline{1, 5}$; $T(R - r^*, l_i^0, T_{0\min}, \alpha_{\max}, \overline{P^0})$, $i = 1, 3, 5$; $T(R - r^*, l_j^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, \overline{P^0})$, $j = 2, 4$; и $T_{\max}(t)$ в системах уравнений (2.29) и (2.33) и уравнении (2.38), соответственно, находятся в результате решения нелинейной системы уравнений

Максвелла и Фурье (2.1) – (2.6), которая может быть решена только с помощью численных методов или с помощью численной модели объекта, разработанной в специализированных программных пакетах.

Это обстоятельство существенно усложняет численное решение задачи и обуславливает необходимость разработки автоматизированной процедуры с возможностью интеграции численной модели, которая подробно описана в главе 3.

2.3 Выводы по второй главе

1. Сформулированы задачи оптимального проектирования двух-виткового индуктора для стадии нагрева поверхностной индукционной закалки стальных заготовок цилиндрической формы при наличии полной информации об объекте и при интервальной неопределенности задания коэффициента тепловых потерь с поверхности изделия и начальной температуры детали. Представлена математическая модель рассматриваемого процесса индукционного нагрева, приведен критерий оптимальности, выбран вектор неизвестных конструктивных параметров индуктора и накладываемые на них ограничения, а также задан диапазон возможных значений не полностью определенных параметров. Показано, что рассматриваемые задачи параметризованы и представляют собой задачи полубесконечной оптимизации, которые могут быть решены с помощью альтернансного метода оптимизации систем с распределенными параметрами.

2. Приведена постановка задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева поверхностной закалки с ограничением на максимально допустимую температуру обрабатываемой детали. Поскольку искомое управляющее воздействие в данной задаче представляет собой бесконечномерную экстремаль, предлагается процедура ее параметризации и редукции к задаче математического программирования, которая может быть решена с помощью альтернансного метода.

3. На базе альтернансного метода параметрической оптимизации предложена новая методика решения сформулированных задач оптимального проектирования индукционной нагревательной установки с полной информацией об объекте и при наличии интервальной неопределенности основных параметров, которая позволяет обеспечить максимально достижимую точность нагрева поверхностного слоя упрочняемой детали. Согласно представленной методике, решение рассматриваемых

задач оптимизации конструкции индуктора можно свести к решению систем трансцендентных уравнений, записанных для температурного распределения по границе закаливаемого слоя и замкнутых относительно всех искомым неизвестных параметров исследуемого процесса. Отмечено, что температуры в приведенных системах уравнений находятся в результате численного решения систем уравнений Максвелла и Фурье для взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, описывающих исследуемую стадию нагрева процесса поверхностной индукционной закалки.

4. Представлен алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева в процессе поверхностной индукционной закалки с учетом фазового ограничения на максимально допустимую температуру поверхности заготовки, который позволяет получить максимальную скорость нагрева поверхностного слоя без локальных перегревов по объему упрочняемой детали. Согласно приведенному алгоритму оптимальная программа управления для данной задачи представляет собой интервал нагрева с максимальным из допустимых значений управляющего воздействия и особый участок движения по ограничению, который может быть аппроксимирован с помощью кусочно-постоянной функции времени.

3 ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОЦЕДУРЫ ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Для численного решения сформулированных в разделе 2.1. задач оптимального проектирования индуктора и оптимального по быстродействию управления стадией нагрева, на основе представленных в разделе 2.2. методик и алгоритмов, в диссертации разработана специальная автоматизированная процедура. В данной главе в разделе 3.3 рассматривается построение процедуры параметрической оптимизации в программном пакете MATLAB с интеграцией в полученную процедуру численной двумерной нелинейной модели процесса индукционного нагрева, созданной в пакете Altair FLUX. Основу процедуры представляет решение систем уравнений, составленных на основе альтернативных свойств оптимальных температурных распределений, с помощью стандартных функций для решения нелинейных систем уравнений программного пакета MATLAB. Для определения численных значений температур при решении систем уравнений в специализированном программном пакете Altair FLUX разработана нелинейная двумерная модель объекта, представленная в разделе 3.2. В разделе 3.1 обоснован выбор программного пакета Altair FLUX для моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей на стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки.

3.1 Современные программные средства моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей

В настоящее время для проектирования и анализа функционирования индукционных нагревательных установок используются математические модели взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, которые могут быть представлены как в аналитической форме, основанной на непосредственном нахождении решения существенно упрощенной системы уравнений Максвелла и Фурье (1.3)-(1.4), так и в виде решений сложных нелинейных многомерных систем уравнений, которые могут быть решены численными методами. Выбор в пользу того или иного вида математической модели в каждом случае зависит от множества факторов, к которым относятся: уровень сложности соответствующей инженерной задачи,

требуемая точность моделирования, ограничения на временные и вычислительные ресурсы и др.

Широкое применение высокоэффективных численных моделей вместо приближенных аналитических со множеством ограничений может быть обусловлено необходимостью учёта ряда принципиальных специфических особенностей рассматриваемого процесса и более высокими требованиями, предъявляемыми к точности расчётов. К наиболее широко используемым численным методам при построении математических моделей электротехнологических процессов, прежде всего, относятся: метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод конечных элементов и гибридный метод [88-92]. Каждый из представленных методов обладает как определенными достоинствами, так и существенными недостатками, которые подробно описаны в [86].

Анализ современного рынка программных комплексов численного моделирования показал, что в подавляющем большинстве пакетов для анализа взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей применяется метод конечных элементов, популярность которого, как показано в [86], обусловлена приемлемой точностью решения, возможностью описания криволинейных границ моделируемой области любой сложности, а также простотой учета граничных условий различного типа. Существующие на рынке современные программные средства для конечно-элементного моделирования можно условно разделить на две группы: коммерческие программные комплексы и пакеты с открытым программным кодом (open-source). Неоспоримыми преимуществами первых являются удобный графический пользовательский интерфейс с интуитивно понятными командами и инструментами, а также часто их узкая направленность на решение конкретных задач моделирования. Пакеты с открытым кодом, в свою очередь, являются условно-бесплатными и позволяют решать принципиально более широкий класс задач численного моделирования, но требуют существенно более глубокого изучения и программирования некоторых специфических функций, которые необходимы для построения модели конкретного технологического процесса.

В приложении А представлены функциональные возможности наиболее часто используемых программных пакетов, представленных на рынке современного конечно-элементного программного обеспечения [86]. Среди коммерческих продуктов можно

выделить ANSYS, FLUX, Abaqus, Elcut и COMSOL [93-97], а среди пакетов с открытым кодом: Agros2D, Elmer, FreeFEM++, ONELAB и OpenFOAM [98-102].

Анализ приведенных в приложении А сведений позволяет сделать вывод о том, что большинство представленных программных пакетов имеют возможность моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей, как стационарных, так и изменяющихся во времени. Все приведенные программные продукты, за исключением Elcut и Agros2D, позволяют пользователю работать не только в двумерной рабочей области, но и строить трехмерные модели. Пакеты ANSYS, FLUX, Abaqus, COMSOL, FreeFEM++ и OpenFOAM имеют встроенную возможность моделирования поступательного движения, характерную для проходных индукционных нагревательных установок [86].

Кроме представленных выше возможностей стоит также отметить, что пакеты FLUX и COMSOL не требуют использования стороннего ПО для экспорта полученной численной модели в инструмент Simulink пакета MATLAB. Это позволяет создавать модели замкнутых систем управления, включающие индукционный нагреватель в качестве объекта управления, и проводить анализ поведения полученных систем, как во временной, так и в частотной областях.

Таким образом, пакетами, обладающими наибольшим набором функциональных возможностей, необходимых для моделирования процессов индукционного нагрева, являются программные пакеты ANSYS и FLUX. Выбор в пользу коммерческого ПО сделан исходя из описанных выше преимуществ данного вида продуктов перед пакетами с открытым программным кодом.

В диссертационном исследовании в качестве инструмента моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей на стадии нагрева процесса индукционной поверхностной закалки был выбран программный пакет Altair FLUX [103]. Данный комплекс, в отличие от универсального многоцелевого программного продукта ANSYS, является специализированным, т.е. обладающим набором инструментов для учета специфических особенностей электромагнитного и теплового анализа. Сравнение программных средств Altair FLUX и ANSYS, подтверждающее обоснованность сделанного выбора, подробно описано в [104].

В настоящее время одним из наиболее перспективных путей повышения эффективности функционирования сложных объектов с распределенными параметрами

представляется междисциплинарный подход к решению задач оптимизации, который заключается в применении современных достижений теории оптимизации и компьютерного моделирования. Этот подход, в частности, предполагает построение оптимизационных процедур на основе высокоэффективных оптимизационных алгоритмов, во многих случаях гарантирующих получение решения близкого к глобальному оптимуму, в комплексе с многомерными нелинейными численными моделями, позволяющими с высокой степенью адекватности отразить реальные свойства оптимизируемых объектов. Объединение этих возможностей, открывающие несомненные перспективы получения результатов нового уровня, связано, тем не менее, с рядом серьезных технических проблем, основной из которых является осуществление эффективного взаимодействия между оптимизационными алгоритмами и численными моделями.

В области оптимизации электротехнологических процессов и систем в настоящее время одной из основных проблем является интеграция численных нелинейных многомерных моделей в разрабатываемые на базе известных методов оптимизационные процедуры. Эта проблема обусловлена рядом факторов, к которым преимущественно относятся: необходимость описания модели с точностью до конечного числа определенных параметров, требования к учёту в разрабатываемой модели специфических особенностей рассматриваемого процесса для получения корректного результата при оптимизации, а также возможность использования распределенных вычислительных ресурсов.

В соответствии с вышесказанным, самостоятельный интерес приобретает разработка автоматизированной процедуры оптимизации и интеграция в неё численных нелинейных проблемно-ориентированных FLUX моделей исследуемого в диссертационной работе процесса индукционного нагрева, алгоритм построения которых описан в следующем разделе диссертационной работы.

3.2 Двумерная нелинейная модель стадии нагрева

В данном разделе представлена проблемно-ориентированная нелинейная двумерная модель стадии нагрева технологии поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок, разработанная в специализированном программном пакете Altair FLUX для анализа взаимосвязанных электромагнитных и

тепловых полей. Подробно описан алгоритм моделирования, а также параметрический анализ и валидация разработанной модели путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторной индукционной установке в Институте Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

3.2.1 Построение численных моделей в программном пакете Altair FLUX

Теоретической основой построения численной модели процесса индукционного нагрева, рассматриваемого в качестве объекта с распределенными параметрами, состояние которого в общем случае определяется пространственно-временным распределением температуры по объему нагреваемой заготовки, является ОРП, является базовая система взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и температурного полей (1.1) - (1.10), представленная в разделе 1.2.

В случае нагрева цилиндрических заготовок осесимметричная нелинейная двумерная модель, описывающая пространственно-временное распределение температуры по объему нагреваемой заготовки, может быть записана в виде системы уравнений (2.1) - (2.6), представленной в разделе 2.1. При этом в результате решения электромагнитной задачи в каждом узле конечного элемента вычисляются значения двух базовых физических характеристик электромагнитных полей: магнитного векторного и электрического скалярного потенциалов, на основе которых в пакете FLUX рассчитываются значения других параметров электромагнитных полей, таких как: плотность тока, плотность магнитного потока и т.д.

Результаты стационарного электромагнитного анализа используются на каждом шаге переходного теплового анализа. Данный анализ в программном комплексе FLUX основан на решении уравнения теплового баланса, базирующегося на законе сохранения энергии. В процессе теплового анализа учитывается не только передача тепла с помощью теплопроводности, но и теплообмен конвекцией и излучением с окружающей средой [86].

В общем виде алгоритм моделирования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в пакете FLUX можно представить в виде, показанном на рисунке 3.1.

На первом шаге данного алгоритма осуществляется создание геометрии рассматриваемой индукционной нагревательной системы, после чего вся рабочая

область разбивается на конечные элементы выбранной формы. Заданные начальные условия позволяют рассчитать температурное распределение в каждом узле конечно-элементной сетки в нулевой момент времени, на основе которого происходит вычисление основных характеристик электромагнитного поля. С помощью полученных значений магнитного векторного и скалярного электрического потенциалов осуществляется расчет количества тепла по закону Джоуля-Ленца. Данная величина используется на этапе теплового анализа, в конце которого вычисляется конечная температура во всех точках рассматриваемой рабочей области [86, 105].

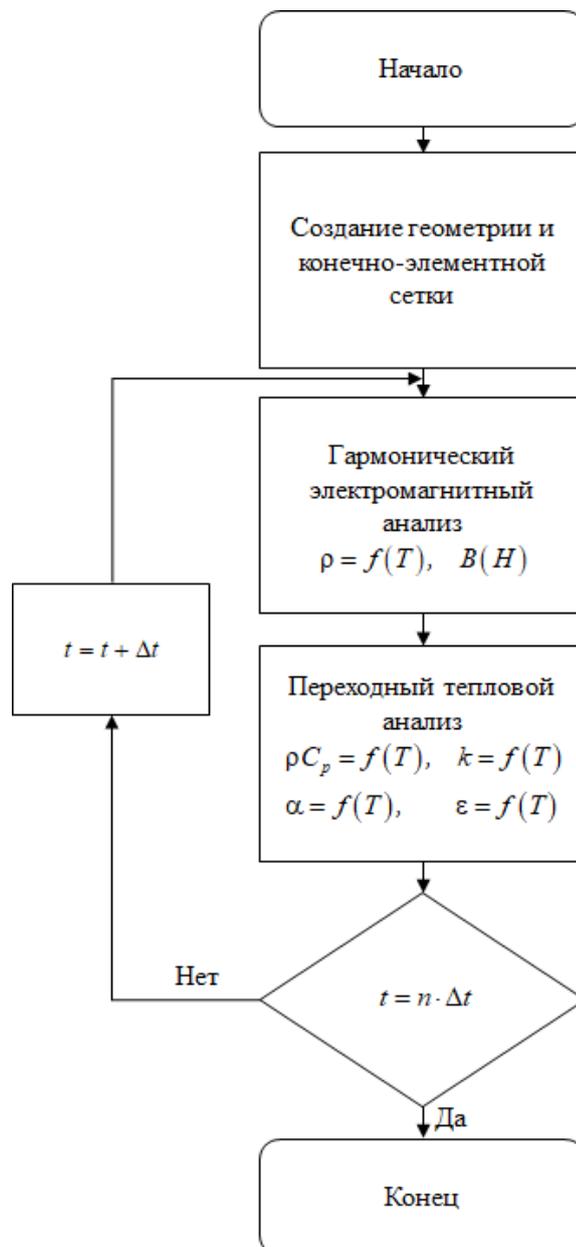


Рисунок 3.1 – Алгоритм электромагнитного и теплового расчета в ПО FLUX

На следующем шаге алгоритма происходит проверка достижения заданного времени окончания процесса, и если оно было достигнуто, то на этом процесс расчета заканчивается. В противном случае, к текущему времени прибавляется значение временного шага, и процедура электромагнитного и теплового расчета повторяется, но уже для нового значения температуры.

На базе данного алгоритма были построены используемые в работе численные конечно-элементные модели нагревательных установок для поверхностной индукционной заковки стальных цилиндрических заготовок.

В качестве примера построения численной модели в пакете FLUX и ее валидации рассматривается процесс периодического индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок (рис. 3.2). Исходные данные для построения модели представлены в таблице 3.1.

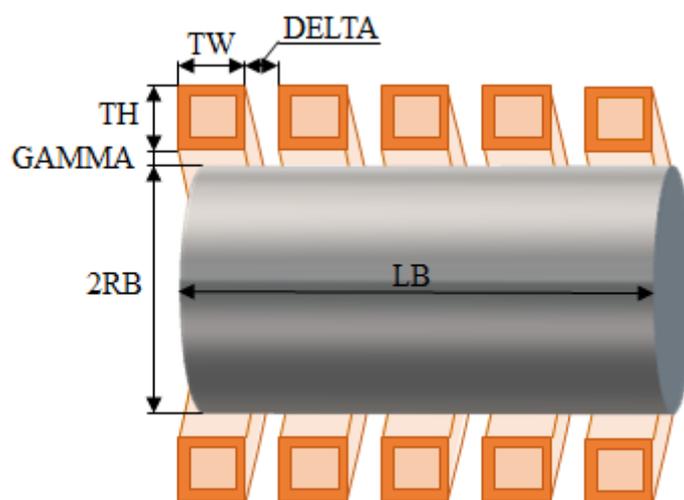


Рисунок 3.2 – Геометрия индукционной нагревательной системы

Построение модели начинается с определения типа решаемой в процессе моделирования задачи. В данном случае, как уже было отмечено, рассматривается взаимосвязанная электромагнитная и тепловая задача. На следующем шаге в предпроцессоре FLUX задаются основные геометрические параметры системы «индуктор-заготовка», представленные в таблице 3.1.

Поскольку данная индукционная нагревательная система для заготовок цилиндрической формы является симметричной относительно оси u , на третьем шаге построения модели необходимо выбрать соответствующий тип рабочей области и задать симметрию по оси ординат.

Таблица 3.1 – Исходные данные для построения модели

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Длина индуктора	LI	0.08	м
Частота питающего тока	f	125000	Гц
Требуемая температура заготовки	T^*	500	°С
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	20	°С
Начальная температура заготовки	T_0	20	°С
Количество витков индуктора	N	5	
Радиус заготовки	RB	0.045	м
Длина заготовки	LB	0.095	м
Расстояние между индуктором и заготовкой	$GAMMA$	0.005	м
Расстояние между витками индуктора	$DELTA$	0.005	м
Геометрические размеры витка индуктора	$TW \times TH$	0.006x0.012	м
Материал заготовки		Сталь (С40) [106]	

После задания симметрии переходят непосредственно к созданию геометрии системы с помощью простейших геометрических объектов: точек и линий. Совокупность точек, соединенных линиями, образует замкнутые геометрические фигуры – области. К данным областям впоследствии будет возможно применить задаваемые физические свойства используемых материалов. На последнем шаге построения геометрии создается область, ограничивающая рабочее пространство разрабатываемой модели. Все операции с геометрией осуществляются в меню «Geometry».

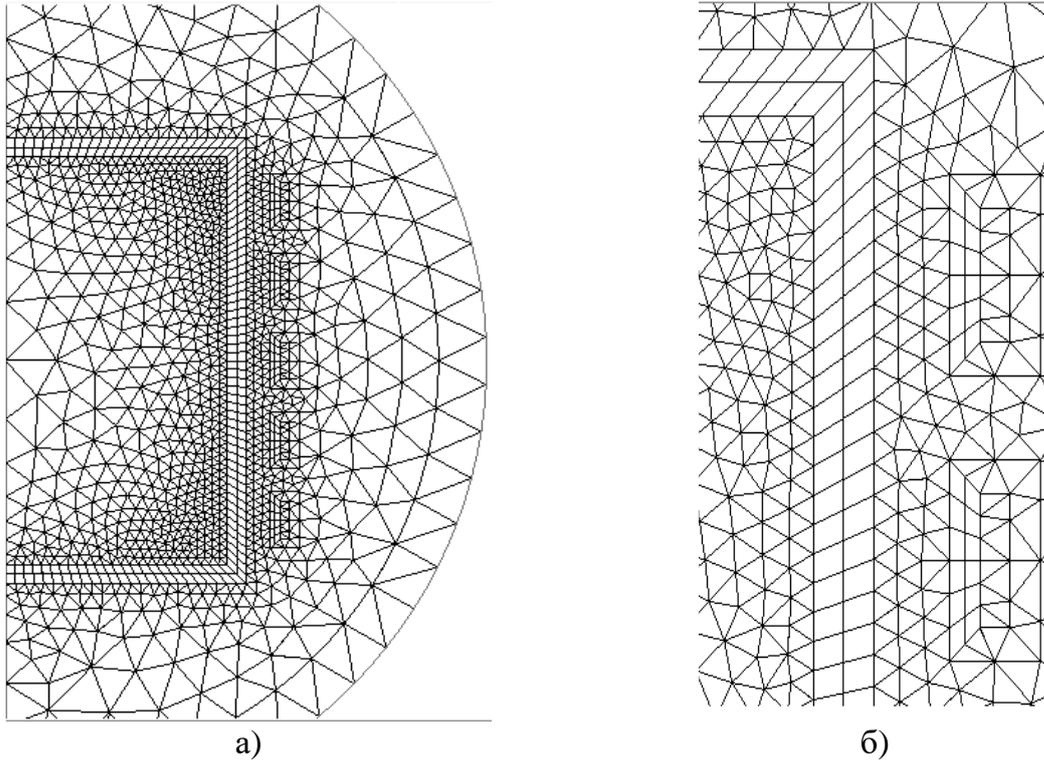
На следующем этапе создания модели в меню «Physics» определяются физические свойства используемых в рассматриваемом технологическом процессе материалов, которые затем с помощью специального инструмента могут быть привязаны к

созданным ранее геометрическим областям. В этом же меню с помощью задания коэффициентов тепловых потерь конвекцией и излучением определяются граничные условия рассматриваемой задачи. Кроме того, в специальном редакторе электрических схем *ElectriFlux* осуществляется моделирование источника питания и задание электромагнитных свойств отдельных витков индуктора.

После задания физических параметров, вся рабочая область разрабатываемой модели должна быть разбита на конечные элементы, при этом тип элемента и плотность разбиения определяется исходя из физических особенностей конкретного процесса. В пакете *FLUX* существует возможность задавать конечные элементы первого и второго порядков треугольной или прямоугольной формы. Поскольку прямоугольные элементы обеспечивают большую плотность конечно-элементной сетки, их применяют для тех областей разрабатываемой модели, в которых необходимо получить более точное решение системы взаимосвязанных уравнений Максвелла и Фурье. Однако необходимо отметить, что выбор данного типа конечного элемента приводит к увеличению времени расчета, поскольку увеличивается количество точек, в которых решаются дифференциальные уравнения электромагнитного и теплового полей. В рассматриваемом случае для процесса индукционного нагрева наибольший интерес с точки зрения конечного результата моделирования представляет область между индуктором и заготовкой. В этой области плотность сетки должна быть максимальной, что приводит к выбору прямоугольных конечных элементов второго порядка. Все остальные области проектируемой модели допускают использование автоматически сгенерированной сетки, использующей конечные элементы треугольной формы. Все настройки по генерированию конечно-элементной сетки производятся в меню «Mesh».

После завершения описанного этапа алгоритма моделирования в предпроцессоре программного пакета *FLUX* сгенерированная конечно-элементная сетка индукционной нагревательной системы примет вид, показанный на рисунке 3.3.

После прохождения этапов численного моделирования в предпроцессоре разработанную модель необходимо сохранить и проверить на наличие ошибок. В случае, если на какой-либо стадии была допущена ошибка, в специальном диалоговом окне программы «Output» появится соответствующее сообщение. Если ошибки отсутствуют, то можно перейти к непосредственному расчету построенной модели в процессоре пакета *FLUX* [86, 105].



а) – общий вид модели; б) – область глубины проникновения
 Рисунок 3.3 – Сгенерированная конечно-элементная сетка индукционной нагревательной системы

В отличие от более ранних версий FLUX [86], в используемой в диссертационном исследовании версии 11.2 предпроцессор и процессор программного пакета физически не разделены. Доступ к ним осуществляется через один и тот же интерфейс, что существенно облегчает процесс моделирования. Поскольку управляемой функцией состояния рассматриваемого процесса индукционного нагрева является пространственно-временное распределение температуры по объему нагреваемой заготовки, для разработанной численной модели задается сценарий расчета, представленный на рисунке 3.4.

При создании сценария есть возможность управлять процессом расчета как при моделировании динамических режимов процесса нагрева за счет изменения времени (Control by time), так и при рассмотрении стационарных процессов нагрева за счет изменения различных физических или геометрических параметров (Control of parameters). При управлении по времени задается начальный и конечный моменты времени и временной шаг, который может быть фиксированным или адаптивным, то есть изменяющимся в процессе расчета. При этом, согласно алгоритму, показанному на рисунке 3.1, на каждом i -ом временном шаге на основе полученного на $(i-1)$ -ом шаге

температурного распределения производится расчет векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов стационарного электромагнитного поля, по значениям которых рассчитывается новое температурное поле.

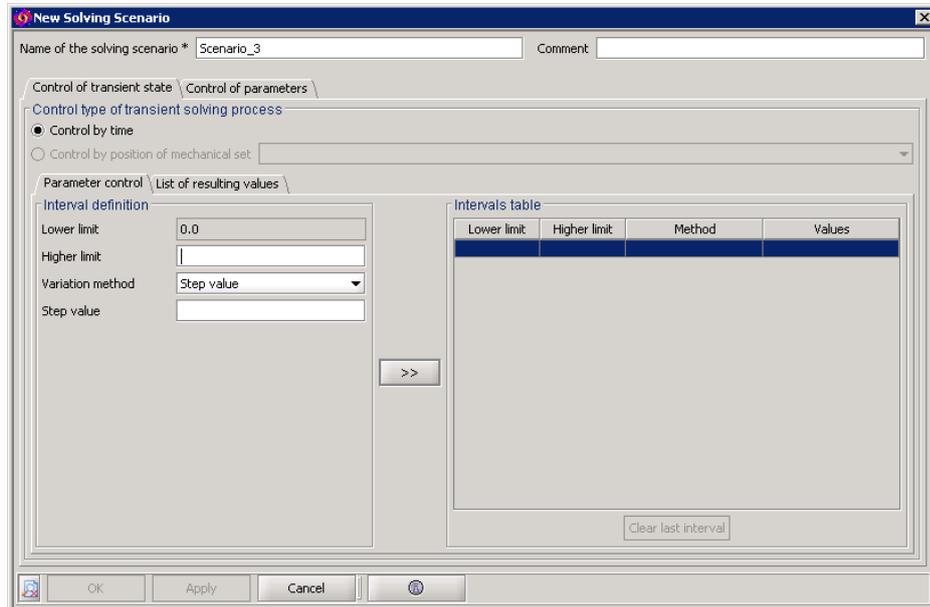


Рисунок 3.4 – Окно создания нового сценария расчета в пакете FLUX

Описанный выше сценарий позволяет произвести расчет модели при неизменных во времени физических величинах. При необходимости подобного изменения, например, при реализации двух-интервального управления по напряжению или току источника питания, или при необходимости контроля значений физических величин на каждом временном шаге, используется специальный режим «Multiphysics» (рис. 3.5).

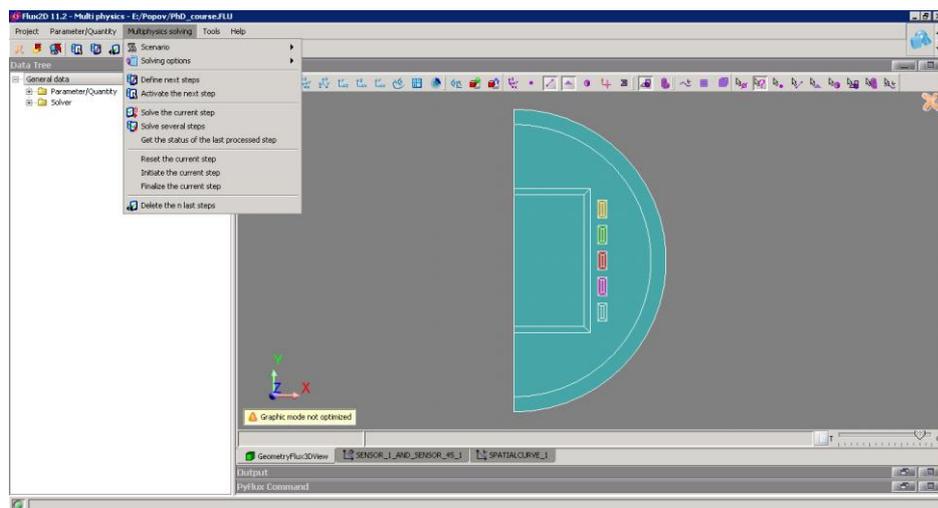


Рисунок 3.5 – Режим «Multiphysics»

По окончании расчета в основном окне FLUX автоматически активируется режим постпроцессора. Этот режим предназначен для анализа полученных в результате численного моделирования результатов. FLUX предлагает пользователю широкие возможности для анализа, например, построение зависимости любого параметра электромагнитного или теплового поля в заданной области от времени. К подлежащим анализу параметрам, в первую очередь, относятся: индуцируемая энергия, сила Лоренца, магнитный поток, напряженность магнитного поля, мощность, плотность тока. Для построения зависимостей электромагнитных параметров от времени необходимо использовать меню Curve/2D curve (I/O Parameter)/New 2D curve (рис.3.6), в котором также существует возможность построения зависимости от времени основных параметров электрической цепи, к которым относятся напряжение источника питания, ток, активное сопротивление и др.

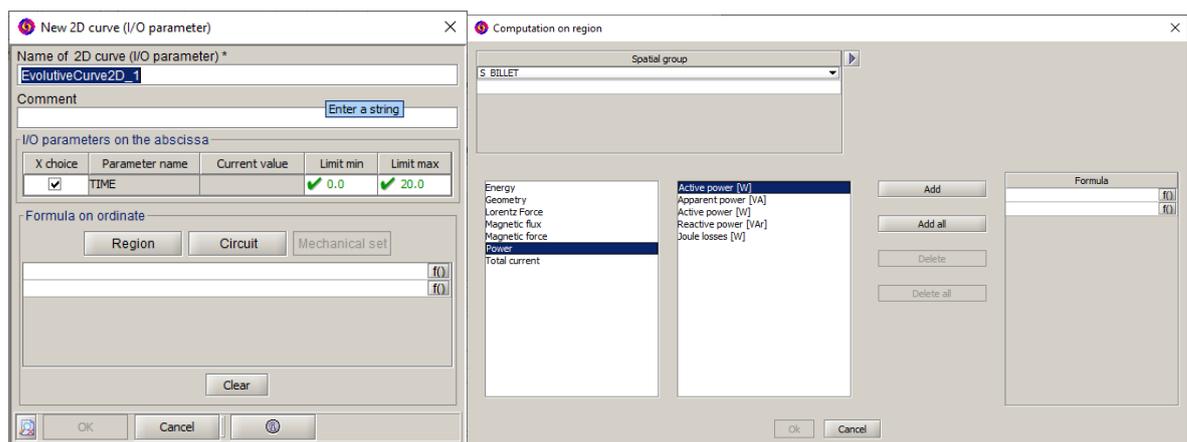


Рисунок 3.6 – Создание новой кривой изменения физического параметра во времени

Кроме временных зависимостей физических параметров FLUX позволяет пользователю строить зависимость выбранных характеристик процесса от пространственных координат. Для этого используется меню Curve/2D curve (Path)/New 2D curve (рис. 3.7).

В данном случае «path» обозначает сечение, вдоль которого контролируется изменение выбранного физического параметра рассматриваемого процесса.

В случае, когда требуется контролировать поведение электромагнитного и теплового поля на каждом шаге расчета, используется инструмент «Isovalues». Данный инструмент позволяет строить двумерные графики распределения температуры или магнитного поля заготовки, распределение плотности тока, плотности магнитного

потока и т.д. Доступ к указанному инструменту осуществляется через меню Graphic/Isovalues/New (рис. 3.8).

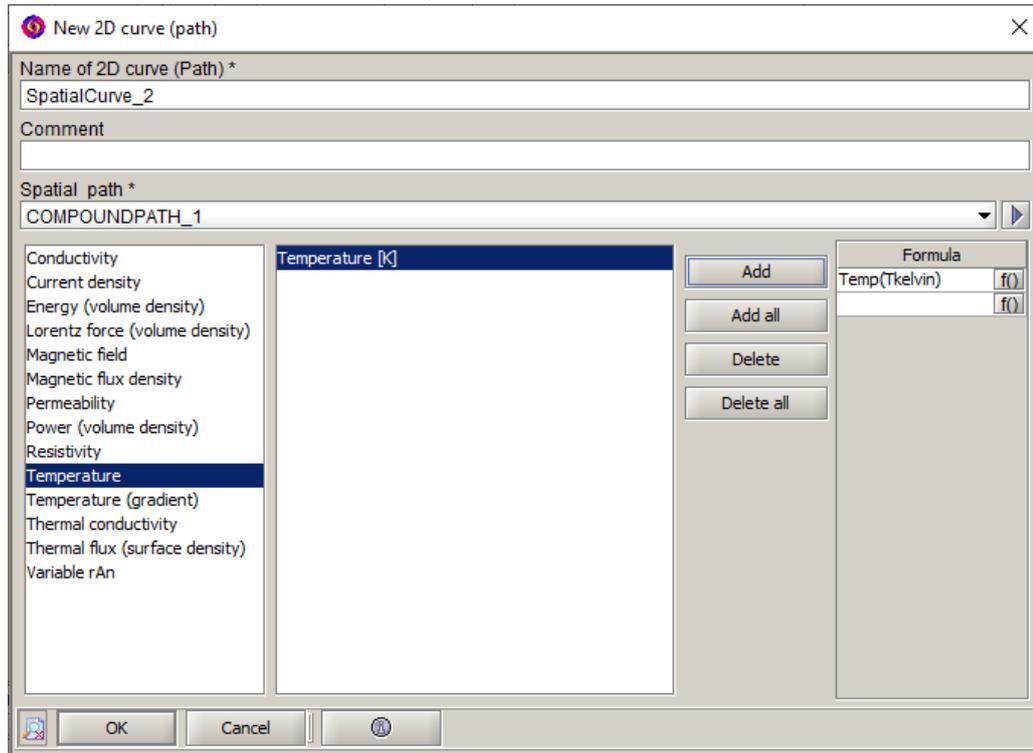


Рисунок 3.7 – Создание кривой изменения физического параметра по пространственной координате

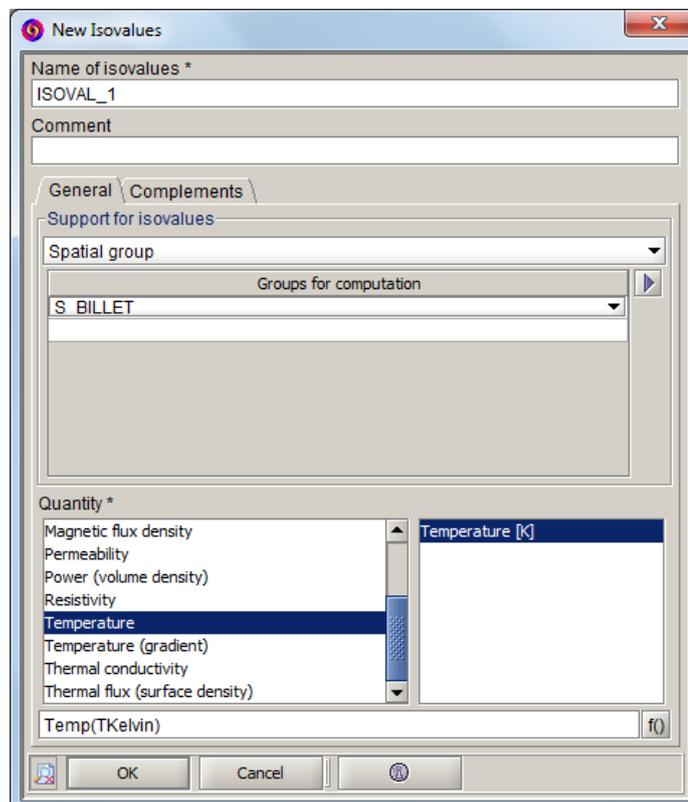


Рисунок 3.8 – Вывод температурного поля заготовки по окончании процедуры расчета

Все перечисленные физические параметры могут быть определены как на каждом временном шаге расчета, так и в конкретной точке рабочего пространства модели. Для получения конкретных значений характеристики в точке используется меню Computation/On point/New session (рис. 3.9 – 3.10), в котором интересующая пользователя точка может быть задана как через указание ее координат, так и графически, путем нажатия на нее левой кнопкой мыши.

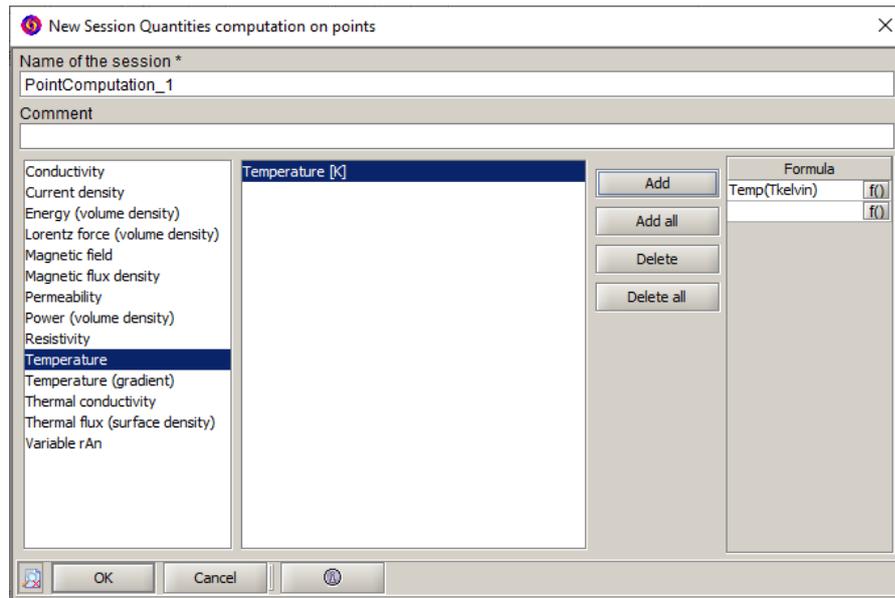


Рисунок 3.9– Вычисление значения параметра в точке

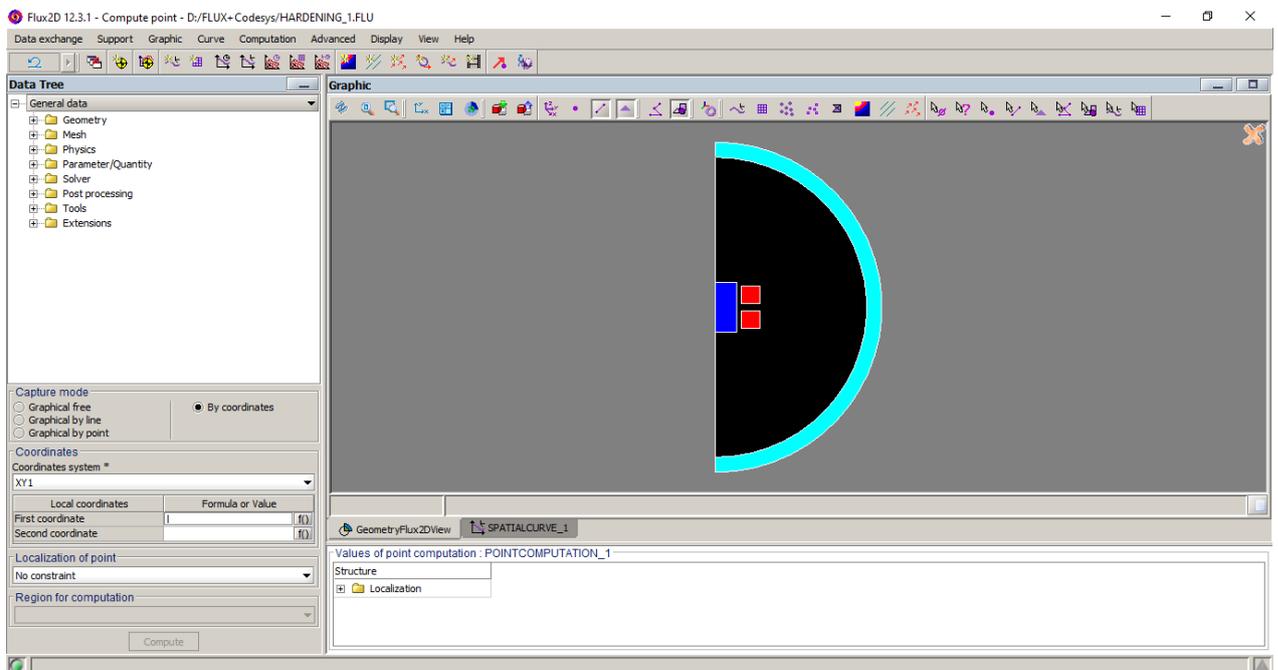


Рисунок 3.10 – Задание координат для вычисления значений параметра

В случае, когда требуется получить изменение во времени заданного параметра, рассчитанного для выбранной точки, применяются так называемые сенсоры. Одним из примеров использования сенсоров может служить контроль температуры в точке заготовки, соответствующей месту установки термопары в нагреваемой заготовке при проведении экспериментов в лабораторных условиях. Доступ к сенсорам осуществляется через меню Advanced/Sensor/New (рис. 3.11).

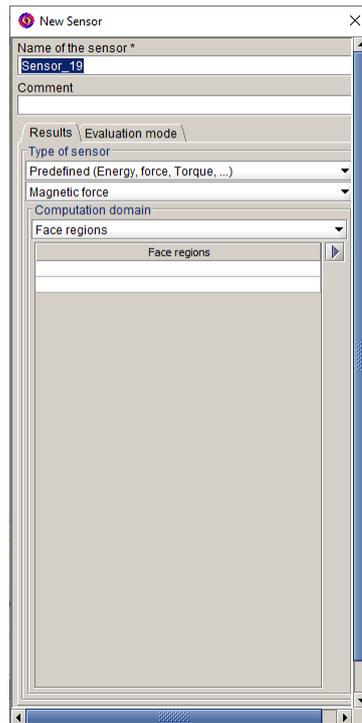


Рисунок 3.11 – Создание сенсора

В рассматриваемом случае для примера использования постпроцессора FLUX построены двумерное температурное распределение по длине заготовки в конце процесса нагрева (рис. 3.12), график изменения индуцируемой в заготовку активной мощности (рис. 3.13), а также температурное распределение по центральному сечению заготовки (рис. 3.14).

Во многих случаях оптимального проектирования и управления процессом нагрева, а особенно при решении задач оптимального по энергопотреблению управления, необходимо контролировать величину полезной энергии, потребляемой на нагрев заготовки. Поскольку энергия представляет собой интеграл по времени от индуцируемой в заготовке мощности, возникает необходимость реализации функции интегрирования средствами программного пакета FLUX.

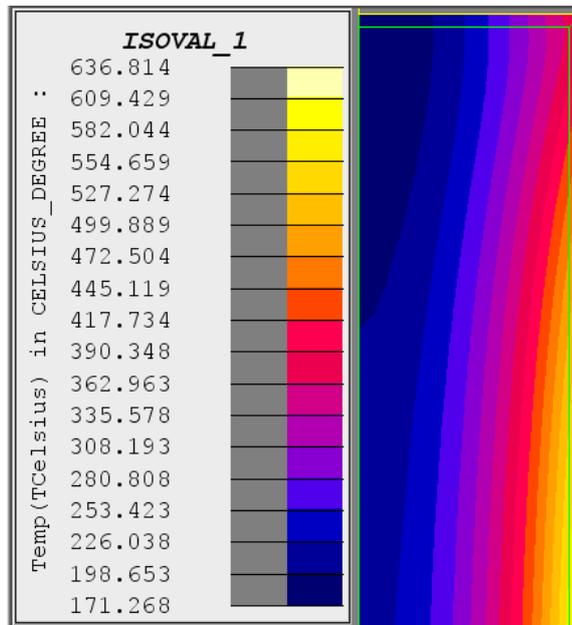


Рисунок 3.12 – Температурное распределение в продольном сечении заготовки

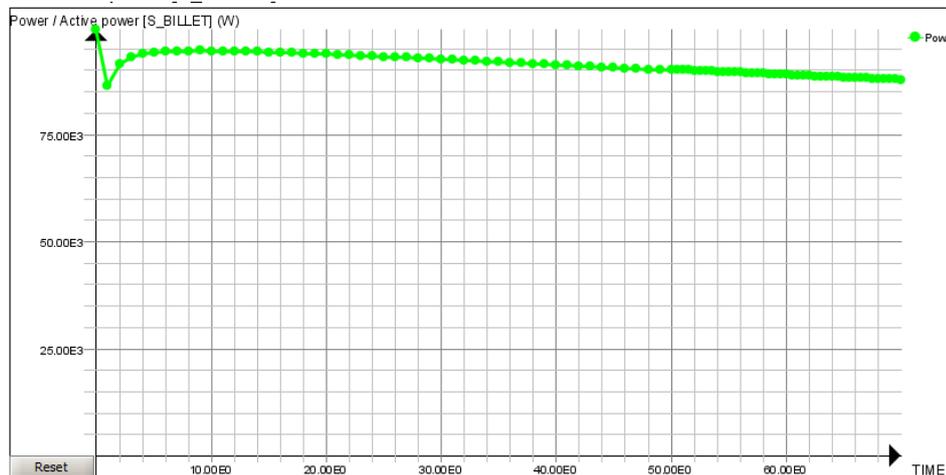


Рисунок 3.13 – Временная зависимость изменения индуцируемой в заготовку мощности

Для вычисления интеграла от некоторой функции, необходимо сначала построить график функции, используя меню 2D curve (path) или 2D curve I/O Parameter, или 2D curve (Material curve). После этого необходимо воспользоваться командой Curve/2D curve/Integral of 2D curve. В результате появится окно, где необходимо выбрать нужную кривую. Для примера был построен график функциональной зависимости активной мощности EVOLUTIVECURVE2D_2 от времени, для которой впоследствии был вычислен интеграл. Процедура реализации операции интегрирования и результат вычисления интеграла показаны на рисунке 3.15.

В разделе 3.2.2 проводится сравнительный анализ результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке.

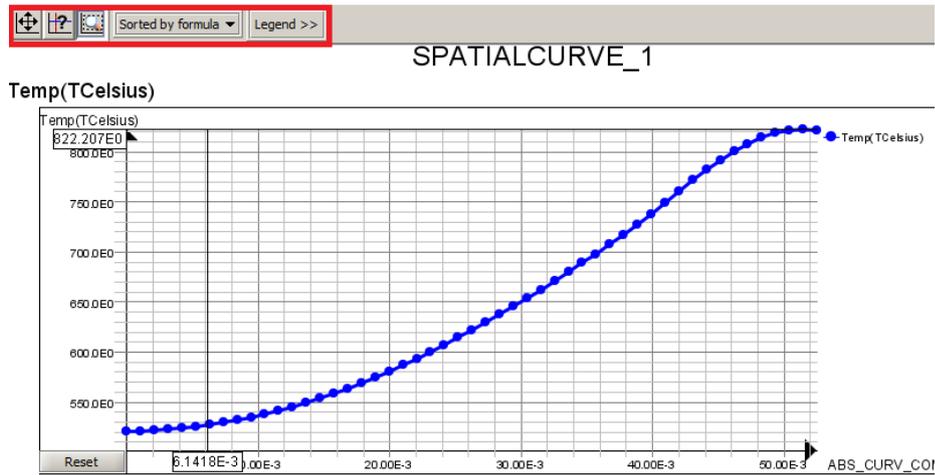


Рисунок 3.14 – Распределение температуры по центральному сечению заготовки

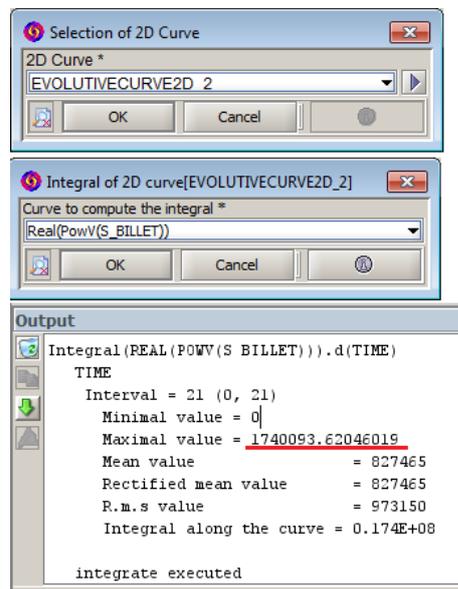


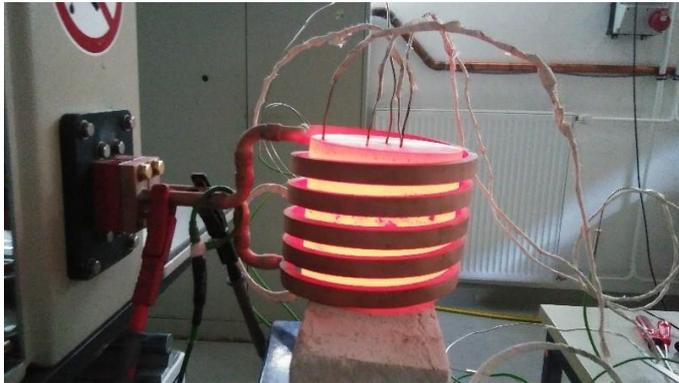
Рисунок 3.15 – Процедура вычисления интеграла

3.2.2 Валидация разработанной численной FLUX модели

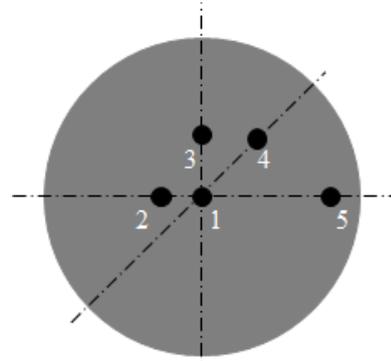
Для валидации построенной в предыдущем разделе численной модели процесса периодического индукционного нагрева цилиндрических заготовок был проведен натурный эксперимент на лабораторной нагревательной установке, сконструированной в Институте Электротехнологий Университета им. Лейбница (г. Ганновер, Германия).

Общий вид индукционной нагревательной системы представлен на рисунке 3.16а, на рисунке 3.16б показано поперечное сечение с указанием мест установки термопар для контроля температуры нагреваемой заготовки. Хромель-алюмелевые термопары типа К диаметром 1 мм устанавливались в отверстия глубиной 25 мм. Для предотвращения растрескивания заготовки отверстия для установки термопар были просверлены в различных продольных сечениях заготовки в точках, имеющих

следующие координаты: 1 – (0;0), 2 – (-11;0), 3 – (0;22), 4 – (23;23), 5 – (44;0) (рис. 3.166).



а)



б)

а – общий вид; б – поперечное сечение заготовки с указанием мест установки термопар
Рисунок 3.16 – Экспериментальная индукционная нагревательная установка

В эксперименте рассматривался процесс нагрева заготовки длительностью 159 секунд при частоте питающего тока 125000 Гц и напряжении источника питания 237 В.

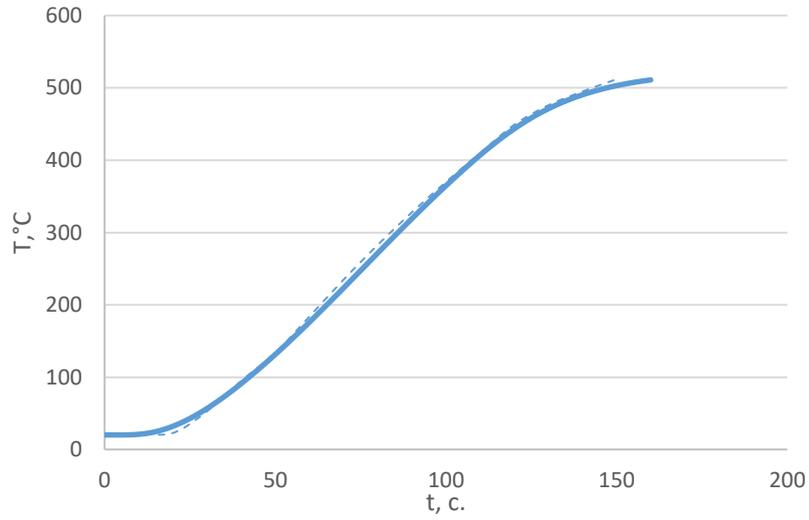
В таблице 3.2 приведены результаты параметрической идентификации численной модели процесса индукционного нагрева металла на основе полученных экспериментальных данных, проведенной по методу наименьших квадратов, в результате которой были получены значения коэффициента конвективного и лучистого теплообмена.

Таблица 3.2 – Значения коэффициентов теплообмена с поверхности для тепловой задачи

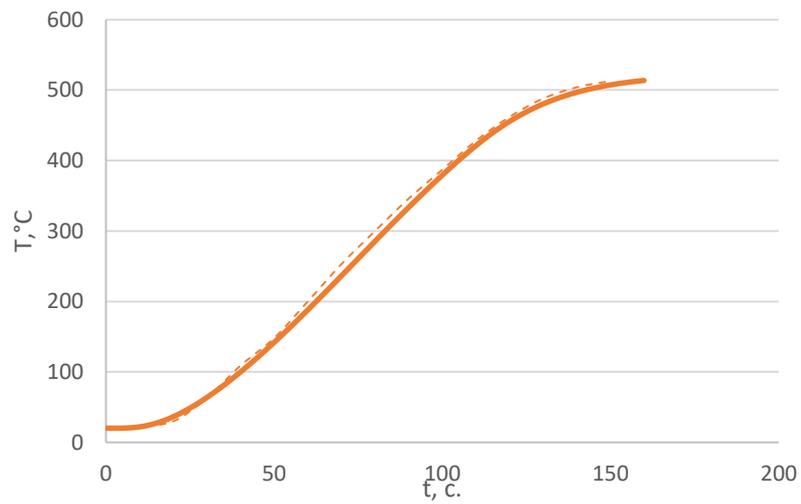
Граничные условия	
Коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м ² °С	2
Коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м ² °С ⁴	0.85

Сравнение результатов расчета конечно-элементной модели процесса с экспериментальными данными для термопар 1, 2 и 5, показаны на рисунке 3.17.

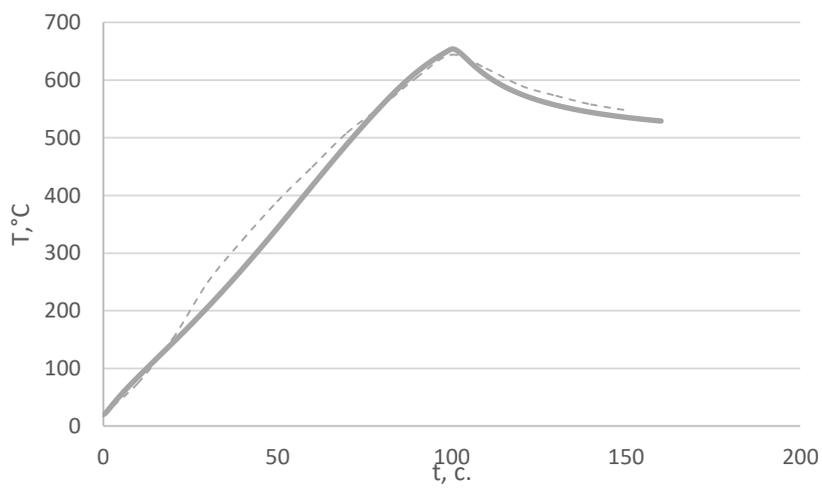
Из представленных графиков очевидно, что результаты численного расчета демонстрируют хорошую сходимость с результатами эксперимента. Среднеквадратичное отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 25°С, что составляет 3% от максимальной температуры заготовки в конце нагрева. Наличие подобного отклонения может быть обусловлено неточностью задания коэффициентов тепловых потерь в численной модели рассматриваемого процесса.



а)



б)



в)

а – термопара 1; б – термопара 2; в – термопара 5

Рисунок 3.17 – Сравнение расчета численной модели и данных физического эксперимента

Валидация разработанной в программном пакете Altair FLUX численной нелинейной модели индукционной нагревательной системы путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными на лабораторной индукционной установке, позволяют сделать вывод о достоверности и удовлетворительной точности описания основных физических закономерностей поведения температурных полей на стадии нагрева, что обусловило возможность использования модели в оптимизационных процедурах.

3.3 Интеграция численной FLUX модели в автоматизированную процедуру параметрической оптимизации

В данном разделе описаны основные принципы построения специализированной автоматизированной процедуры параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки в пакете прикладных программ MATLAB с интеграцией разработанной численной двумерной FLUX модели процесса индукционного нагрева. Представленная процедура позволяет экономить вычислительные ресурсы и существенно снижать время расчетов по сравнению с известными численными методами оптимизации.

Рассмотрим основные принципы построения процедур параметрической оптимизации на основе реализованных в программном пакете MATLAB оптимизационных алгоритмов с возможностью интеграции численных конечномерных моделей для анализа взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе нагрева. Общая схема процедуры оптимизации представлена на рисунке 3.18.

На первом шаге процедуры задаются исходные данные для построения численной модели рассматриваемого процесса. Определяются начальные значения неизвестных оптимизируемых параметров, к которым могут относиться как конструктивные и физические характеристики нагревательной системы, так и управляющие воздействия, представленные в параметризованной форме, после чего эти значения используются при построении геометрии системы, задании электромагнитных и теплофизических свойств используемых материалов, начальных значений температуры обрабатываемого изделия и окружающей среды, коэффициентов тепловых потерь и т.д.

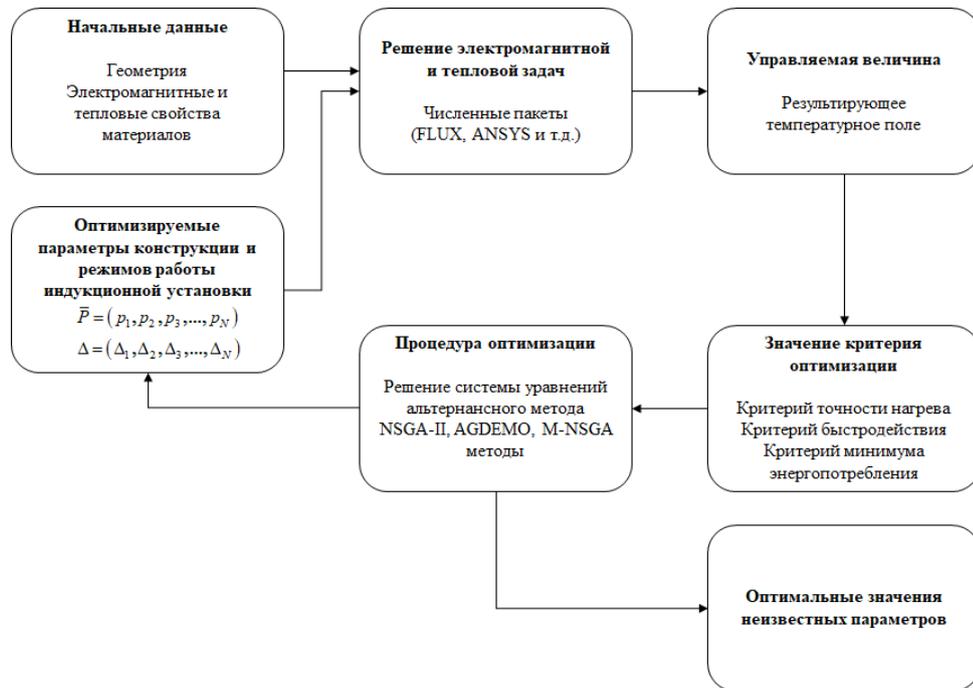


Рисунок 3.18 – Общая схема автоматизированной процедуры оптимизации

На следующем шаге производится расчет электромагнитного и теплового полей в численной модели с заданными начальными значениями параметров. При этом управляемой величиной или выходом модели является результирующее температурное поле по объему нагреваемой заготовки. На третьем шаге осуществляется расчет выбранного на этапе формулировки задачи критерия оптимальности, которое затем передается в основную процедуру оптимизации, основанную на использовании альтернативного метода, NSGA-II метода или любого другого оптимизационного алгоритма. В случае, если в результате расчета параметры процесса оказались оптимальными по выбранному критерию, то на этом работа процедуры оптимизации заканчивается. Иначе рассчитанные значения оптимизируемых параметров вновь передаются в численную модель процесса и процесс поиска оптимальных значений начинается со второго шага.

Стоит отметить, что в рассмотренной численной процедуре невозможно точно получить нулевое значение критерия оптимизации, поэтому процесс расчета также останавливается при достижении критерием некоторой близкой к нулю величины с заранее заданной точностью.

Одним из существенных преимуществ, выделяющих программный пакет Altair FLUX среди конкурентов при интегрировании моделей в оптимизационные процедуры, является то, что основной код данного продукта написан на языке программирования

Python. Поэтому одним из возможных вариантов реализации общей процедуры оптимизации, показанной на рисунке 3.18 является совместное использование пакета численного моделирования FLUX и программного кода Python.

Схема подобной оптимизационной процедуры показана на рисунке 3.19.



Рисунок 3.19 – Схема процедуры оптимизации, основанной на совместном использовании пакетов FLUX и Python

В отличие от общей схемы, представленной на рисунке 3.18, в данном случае рассматривается процедура, основанная на решении соответствующих систем уравнений для сформулированных задач оптимального проектирования или управления, составленных на основе предложенных в главе 2 методик. В отличие от общей схемы оптимизационной процедуры, представленной на рисунке 3.18, в данном случае не предусматривается отдельное вычисление минимизируемого функционала, поскольку его экстремальное значение определяется при решении систем уравнений, составленных на основе альтернансного метода.

Таким образом, на первом шаге предложенной процедуры параметрической оптимизации происходит запуск решателя для нелинейной системы уравнений с начальными значениями неизвестных оптимизируемых параметров, которые передаются во FLUX модель процесса. В задаче оптимального проектирования к таким параметрам относятся конструктивные и физические характеристики нагревательной системы $\bar{P} = (p_i), i = \overline{1, N}$, а в задаче оптимального управления – длительности интервалов постоянства параметризованного управляющего воздействия $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$.

Пространственно-временное температурное распределение по объему обрабатываемой детали, получаемое при расчете численной модели, разработанной в разделе 3.2, используется при решении системы уравнений альтернансного метода, записанной для соответствующей задачи оптимизации. В общем случае системы

уравнений для задач оптимального проектирования с полной информацией об объекте и с интервальной неопределенностью основных характеристик имеют вид (2.27), (2.31), соответственно. Система соотношений в задаче оптимального управления записывается в форме (2.34). В случае, если решение найдено, значения оптимизируемых параметров сохраняются в отдельном текстовом файле. В противном случае, происходит повторный расчет значений оптимизируемых параметров, которые снова передаются в численную модель для электромагнитного и теплового анализа, после чего начинается новая итерация оптимизационной процедуры.

Преимущество данной процедуры заключается в том, что все инструкции, задаваемые пользователем, обрабатываются в одной программной среде Python, что снижает время расчетов по сравнению с другими вариантами реализации, основанными на использовании стороннего программного обеспечения.

К недостаткам оптимизационной процедуры можно отнести необходимость установки дополнительных модулей в Python для решения систем нелинейных уравнений, поскольку в ядре языка Python решатели таких систем отсутствуют. Кроме того, язык программирования Python является весьма требовательным к синтаксису программного кода, что может существенно усложнить работу исследователя, заранее незнакомого с этим языком.

Ввиду наличия отмеченной ранее встроенной возможности интеграции разрабатываемой в пакете FLUX модели в программу MATLAB, второй вариант реализации общей схемы процедуры оптимизации на рисунке 3.18 основан на совместном использовании этих продуктов [58, 107, 108]. В этом случае оптимизационная процедура примет вид, аналогичный рассмотренной ранее Python-FLUX оптимизации (рис. 3.20).



Рисунок 3.20 - Схема процедуры оптимизации, основанной на совместном использовании пакетов FLUX и MATLAB

Поскольку в данном случае используется программный комплекс MATLAB, взаимодействие которого с пакетом FLUX осуществляется по клиент-серверной технологии, основное отличие представленной схемы от схемы на рисунке 3.19 заключается в наличии блока «запуск FLUX сервера». На этом этапе процедуры оптимизации происходит запуск Altair FLUX в роли сервера, к которому в качестве клиента подключается пакет MATLAB. Обмен данными между представленными программными комплексами на каждом шаге приведенной процедуры оптимизации осуществляется с помощью текстовых файлов. Остальные шаги процесса поиска оптимальных значений неизвестных оптимизируемых параметров совпадают со схемой Python-FLUX.

В отличие от приведенной выше процедуры оптимизации Python-FLUX, программный пакет MATLAB, изначально ориентированный на решение математических задач, имеет в своем инструментарии различные решатели как для нелинейных уравнений, так и для систем таких уравнений, к которым относятся функции: `fsolve`, `fmincon`, `lsqnonlin` и другие. Функция `fsolve` предназначена для решения системы нелинейных однородных уравнений без ограничений на искомые неизвестные параметры. Функция `fmincon` позволяет найти значения параметров, минимизирующих заданную нелинейную функцию. Существенным отличием данной функции от `fsolve` является возможность задания ограничений для неизвестных переменных. Функция `lsqnonlin` осуществляет поиск неизвестных значений переменных, которые минимизируют значение нелинейной функции, являющейся суммой квадратов невязок системы однородных нелинейных уравнений. В данном случае также можно накладывать ограничения на искомые оптимизируемые параметры [109].

Приведенные в последующих разделах диссертационной работы результаты решения сформулированных в главе 2 задач оптимального проектирования индукционного нагревателя с полной информацией об объекте и в условиях интервальной неопределенности параметров, а также задачи оптимального по быстродействию управления с фазовым ограничением на максимальную температуру были получены с применением процедуры оптимизации, основанной на совместном использовании пакетов FLUX и MATLAB.

3.4 Выводы по третьей главе

1. Подробно рассмотрены современные программные средства для численного моделирования взаимосвязанных электромагнитного и теплового полей. На основе проведенного анализа для моделирования стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, являющейся предметом диссертационного исследования, выбран программный пакет Altair FLUX.

2. Рассмотрен процесс построения проблемно-ориентированной численной нелинейной модели индукционной нагревательной системы в программном пакете Altair FLUX для анализа взаимосвязанных электромагнитных и тепловых полей в процессе поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок. Представлен алгоритм моделирования, включающий следующие основные шаги: создание геометрии, задание физических параметров системы и генерация конечно-элементной сетки в предпроцессоре, расчет разработанной модели в процессоре и обработку полученных результатов моделирования в постпроцессоре.

3. Для подтверждения соответствия результатов моделирования известным физическим закономерностям и обоснования возможности их использования в оптимизационной процедуре проведена валидация разработанной модели путем сравнения с результатами физического эксперимента на реальной лабораторной нагревательной установке, сконструированной в Институте электротехнологий Университета имени Лейбница (г. Ганновер, Германия).

4. Рассмотрена общая схема автоматизированной процедуры оптимизации конструктивных и режимных характеристик индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки. Показано, что существуют два варианта реализации рассмотренной процедуры оптимизации, основанные на совместном использовании пакета Altair FLUX и языка программирования Python или программного пакета MATLAB. На основе анализа основных достоинств и недостатков приведенных способов реализации автоматизированной процедуры оптимизации, для решения сформулированных в диссертационном исследовании задач оптимального проектирования и управления режимами индукционной нагревательной установки для поверхностной закалки была выбрана процедура, разработанная в среде MATLAB с интегрированной численной двумерной нелинейной моделью процесса нагрева, разработанной в пакете Altair FLUX.

4 ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ НА БАЗЕ АЛЬТЕРНАНСНОГО МЕТОДА

В представленной главе рассматривается численное решение сформулированных в главе 2 задач оптимального проектирования в условиях полной информации об объекте и при наличии интервальной неопределенности начальной температуры заготовки и коэффициента теплообмена с её поверхности и задачи оптимального по быстродействию управления с фазовым ограничением на максимальную температуру обрабатываемого изделия на основе предложенных в разделах 2.2.1 и 2.2.2 методики и алгоритма. Численные результаты решения рассматриваемых задач получены с помощью разработанной в главе 3 специализированной процедуры оптимизации.

4.1 Решение задачи оптимального проектирования индуктора для поверхностной индукционной закалки стальных заготовок

В данном разделе главы решение сформулированной в разд. 2.1.1 задачи оптимального проектирования индуктора проводится на основе разработанной в разд. 2.2.1 методики с помощью описанной в главе 3 процедуры оптимизации. В оптимизационную процедуру интегрирована численная двумерная нелинейная модель процесса индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок в двух-витковом индукторе, разработанная в программном пакете Altair FLUX по алгоритму моделирования, описанному в разделе 3.2.1. Геометрия индуктора и заготовки представлена на рисунке 2.1, основные исходные данные для построения модели приведены в таблице 4.1. Согласно постановке задачи оптимального проектирования, вектор \bar{P} оптимизируемых параметров содержит конструктивные характеристики индукционной нагревательной системы (рис. 2.1), к которым относятся размер витка индуктора (p_1), расстояние между индуктором и заготовкой (p_2), расстояние между витками нагревателя (p_3) и ток источника питания I .

На параметры вектора \bar{P} накладываются следующие ограничения:

$$5 \leq p_1 \leq 15, 2 \leq p_2 \leq 10, 3 \leq p_3 \leq 15, 500 \leq I \leq 1500. \quad (4.1)$$

Общий вид FLUX модели рассматриваемой системы «индукционная установка – заготовка» с наложенной конечно-элементной сеткой представлен на рис. 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для построения модели

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Частота питающего тока	f	100000	Гц
Требуемая температура заготовки	T^*	900	°С
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	20	°С
Начальная температура заготовки	T_0	20	°С
Количество витков индуктора	N	2	
Радиус заготовки	RB	14	мм
Длина заготовки	LB	32.9	мм
Время нагрева	t	8	с
Толщина закаливаемого слоя	r^*	4	мм
Материал заготовки		Сталь (С40) [74-75]	

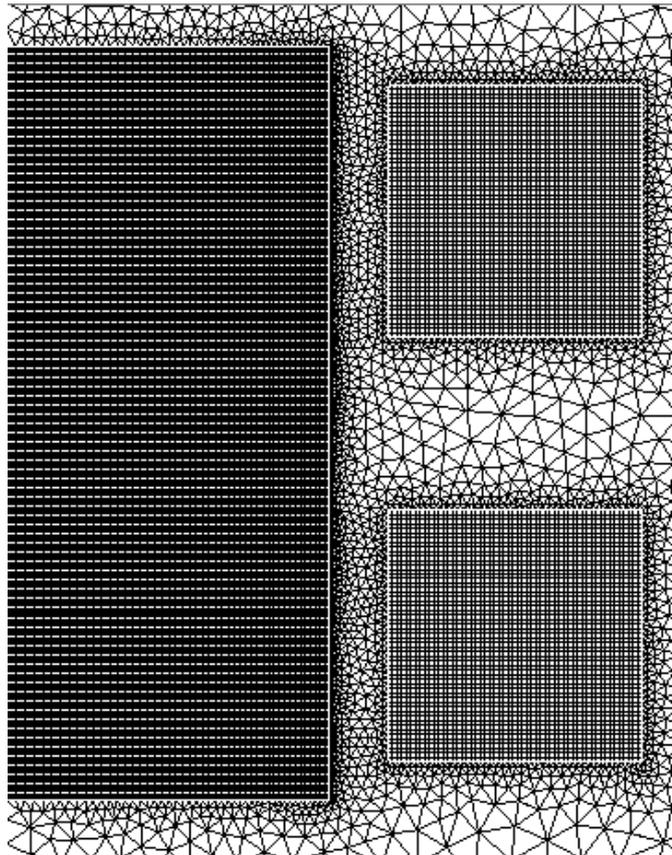


Рисунок 4.1 – Численная FLUX модель нагревательной системы

Поскольку в сформулированной задаче оптимального проектирования неизвестных параметров $N=4$, то, согласно описанной в разделе 2.2.1 методики, в рассматриваемом сечении заготовки по границе закаливаемого слоя при $r = R - r^*$

существует $K=5$ точек $l_j^0, j=1, \overline{K}$ с максимальным температурным отклонением от требуемого значения T^* . При этом, принимая во внимание наличие тепловых потерь с поверхности изделия, можно предположить, что минимальные значения температуры будут наблюдаться в точках на торцах заготовки с координатами $l_1^0 = 0; l_5^0 = L$, и, следовательно, число экстремумов тогда принимает значение $K_1 = 3$.

Таким образом, система уравнений альтернативного метода для данной задачи, составленная для продольного сечения, находящегося на расстоянии $r^* = 4$ мм от поверхности обрабатываемой детали, будет иметь вид (2.29).

Данная система из восьми уравнений оказывается замкнутой относительно всех восьми неизвестных параметров: четырех компонентов вектора оптимизируемых параметров $\overline{P^0}$, трех координат точек экстремума l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значения точности нагрева $\varepsilon_{\min}^{(4)}$, что позволяет найти ее решение.

Для всех указанных неизвестных параметров процесса с учетом ограничений (4.1) были заданы начальные значения, которые представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Начальные значения неизвестных параметров

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Значение	13 мм	4 мм	3 мм	1045 А	-

Указанные начальные значения и ограничения использовались для реализации автоматической процедуры оптимизации, показанной на рисунке 3.20. Для нахождения численного решения задачи оптимального проектирования с помощью итерационной процедуры поиска оптимальных значений параметров потребовалось 11 итераций (приблизительно 100 вызовов FLUX-модели).

Найденные оптимальные значения всех неизвестных параметров приведены в таблице 4.3 [84].

Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя $r = R - r^*$ в конце стадии нагрева поверхностной индукционной закалки с оптимальными значениями конструктивных параметров индуктора показано на рисунке 4.2.

Как видно из результатов, максимальное отклонение температуры вдоль границы упрочняемого слоя заготовки составляет не более 11.5°C , что полностью удовлетворяет

самым жестким технологическим требованиям, предъявляемым к процессу поверхностной закалки.

Таблица 4.3 – Результаты решения задачи оптимального проектирования

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Значение	11.9 мм	3 мм	4.4 мм	1382 А	11.5°C

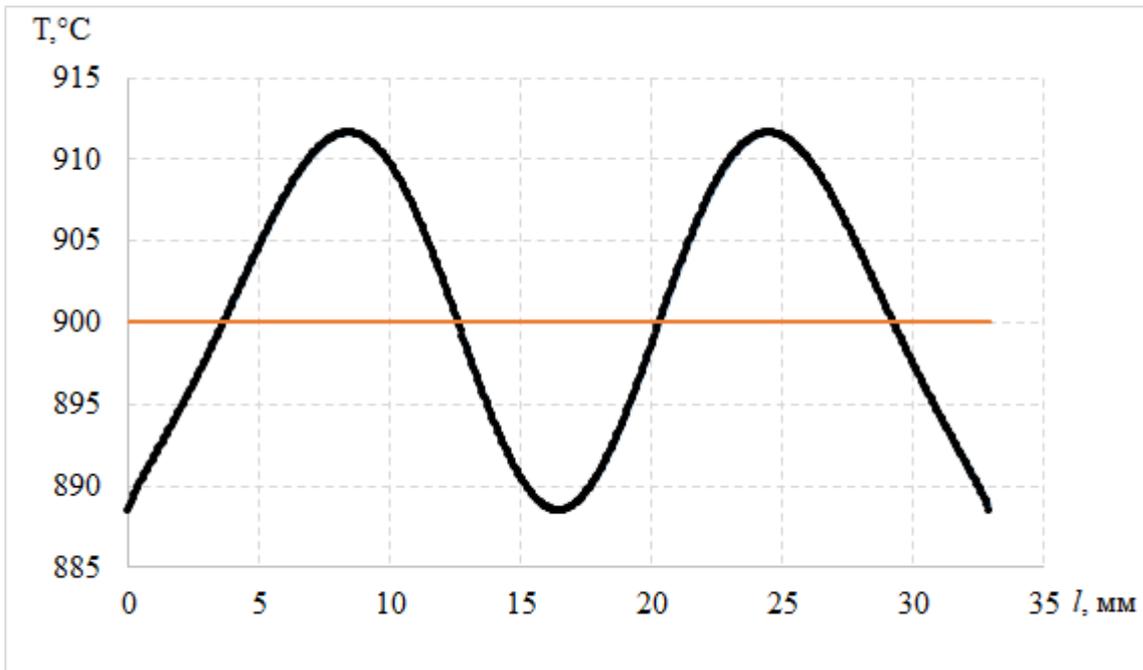


Рисунок 4.2 – Результирующее температурное распределение на границе закаливаемого слоя $r = R - r^*$

В результате решения задачи оптимального проектирования в программном пакете Altair FLUX было получено конечное температурное поле в продольном сечении заготовки, которое представлено на рисунке 4.3.

Из приведенного рисунка очевидно, что при найденных значениях неизвестных конструктивных параметров индукционного нагревателя, обеспечивающих требуемую равномерность температурного распределения по границе закаливаемого слоя, на поверхности обрабатываемой детали наблюдается существенный перегрев. Для его количественной оценки было построено распределение температур по окончании оптимального процесса нагрева вдоль боковой поверхности заготовки, которое показано на рисунке 4.4.

Анализ данного температурного распределения показывает, что максимальный перегрев поверхности заготовки относительно допустимой температуры $T_{\text{дон}} = 1050^\circ\text{C}$

достигает 140°C , что недопустимо по технологии индукционной заковки. Для исключения подобного перегрева необходимо ввести дополнительное фазовое ограничение на максимальную температуру вида (2.11) и перейти к решению задачи оптимального управления с учетом соответствующего фазового ограничения. Решение этой задачи по алгоритму, представленному в разделе 2.2.2, рассматривается в разделе 4.4.

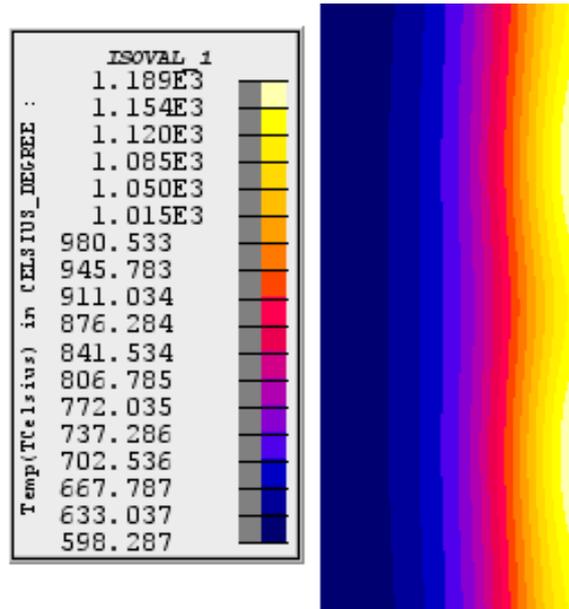


Рисунок 4.3 – Температурное поле в продольном сечении заготовки в конце оптимальной стадии нагрева процесса поверхностной индукционной заковки

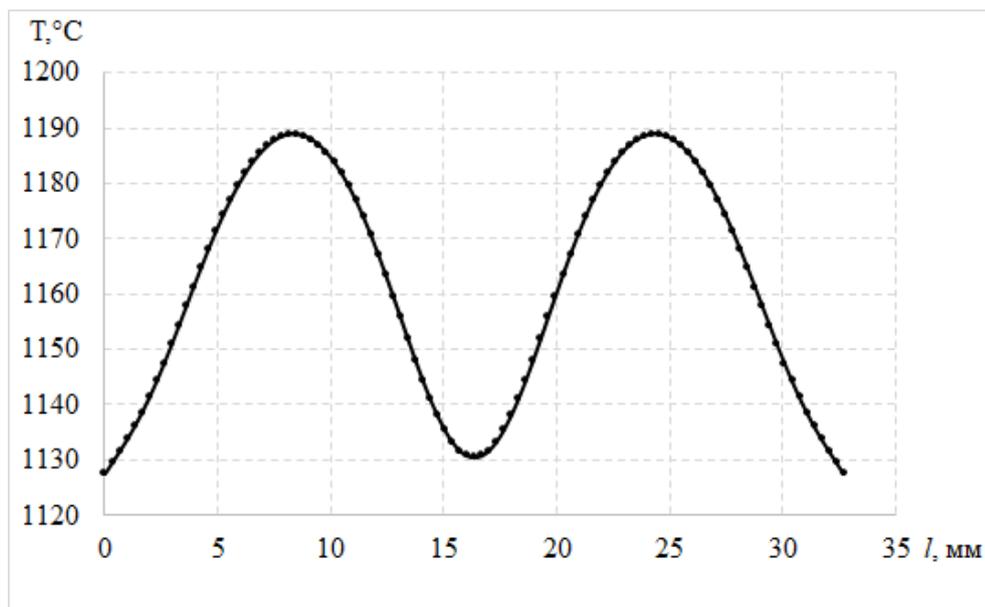


Рисунок 4.4 – Конечное распределение температуры вдоль боковой поверхности изделия

4.2 Сравнение результатов решения задачи оптимального проектирования с решением, полученным с помощью генетических алгоритмов

Для сравнительного анализа полученного в разделе 4.1 решения задачи оптимального проектирования, рассматриваемая задача оптимального проектирования решена с помощью двух методов оптимизации: альтернативного метода и метода AGDEMO [110-111]. Исходные данные для указанной задачи представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Исходные данные для построения модели

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Частота питающего тока	f	100000	Гц
Требуемая температура заготовки	T^*	900	°C
Температура окружающей среды	$T_{окр}$	20	°C
Начальная температура заготовки	T_0	20	°C
Количество витков индуктора	N	2	
Радиус заготовки	RB	11	мм
Длина заготовки	LB	32.9	мм
Время нагрева	t	10	с
Толщина закаливаемого слоя	r^*	2	мм
Материал заготовки		Сталь (С40)	

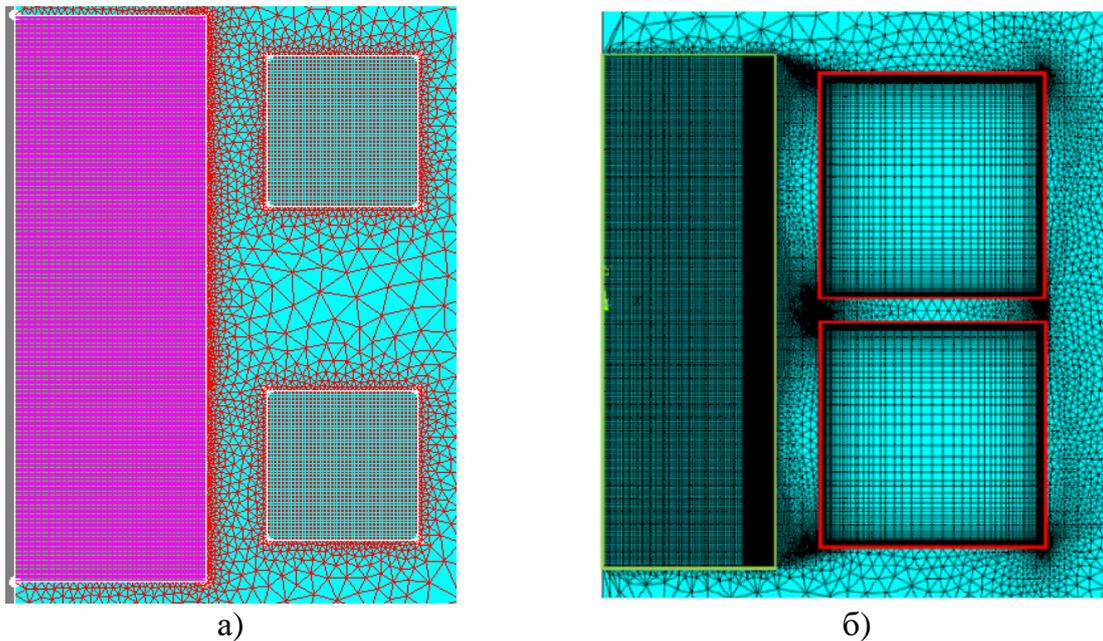
Как и в рассмотренной ранее задаче, в данном случае вектор неизвестных параметров содержит четыре компоненты $\bar{P} = (p_1, p_2, p_3, I)$, на которые накладываются следующие ограничения:

$$5 \leq p_1 \leq 15, 5 \leq p_2 \leq 15, 3 \leq p_3 \leq 15, 500 \leq I \leq 1200. \quad (4.2)$$

Для решения данной задачи оптимального проектирования были разработаны численные модели в программных пакетах FLUX (рис. 4.5а) и ANSYS (рис. 4.5б).

Метод AGDEMO (Adaptive Gaussian Process-Assisted Differential Evolution for MEMS Design Optimization) относится к классу стохастических алгоритмов оптимизации и позволяет находить глобальный экстремум не дифференцируемых, нелинейных функций от многих переменных, в некоторых случаях, имеющих множество локальных экстремумов [112].

Метод M-NSGA является разновидностью генетических алгоритмов не доминирующей сортировки, отличительной особенностью которого является наличие так называемых мутаций, появляющихся в некоторых популяциях. Как правило исходный алгоритм NSGA-II, на котором основан M-NSGA, оказывается очень чувствительным к заданным начальным приближениям, поэтому в некоторых случаях попадание в глобальный минимум искомой целевой функции оказывается невозможным. Введение подобных мутаций делают алгоритм M-NSGA менее зависящим от задаваемых начальных приближений [113-114].



а – в пакете FLUX; б – в пакете ANSYS

Рисунок 4.5 – Разработанные численные модели с конечно-элементной сеткой

Результаты решения сформулированной задачи оптимального проектирования с помощью представленных методов оптимизации сведены в таблицу 4.5 [111].

Таблица 4.5 – Сравнение результатов решения задачи оптимального проектирования

Оптимизируемые параметры	Начальные значения					Оптимальные значения				
	P_1	P_2	P_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$	P_1	P_2	P_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Альтернативный метод	8.7	3.5	10.7	990	-	13.31	4.30	3.0	1045	2
AGDEMO	8.7	3.5	10.7	990	-	13.30	4.25	3.0	1046	2
M-NSGA	8.7	3.5	10.7	990	-	5.2	9.9	11.3	1179	15.9

Анализ результатов численного решения показывает, что при использовании альтернансного метода оптимизации и алгоритма AGDEMO были получены не отличающиеся существенно решения задачи оптимального проектирования. Однако, при использовании метода M-NSGA были получены результаты, значительно уступающие по точности нагрева альтернансному методу оптимизации и алгоритму AGDEMO.

Сравнение конечных температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя представлено на рисунке 4.6.

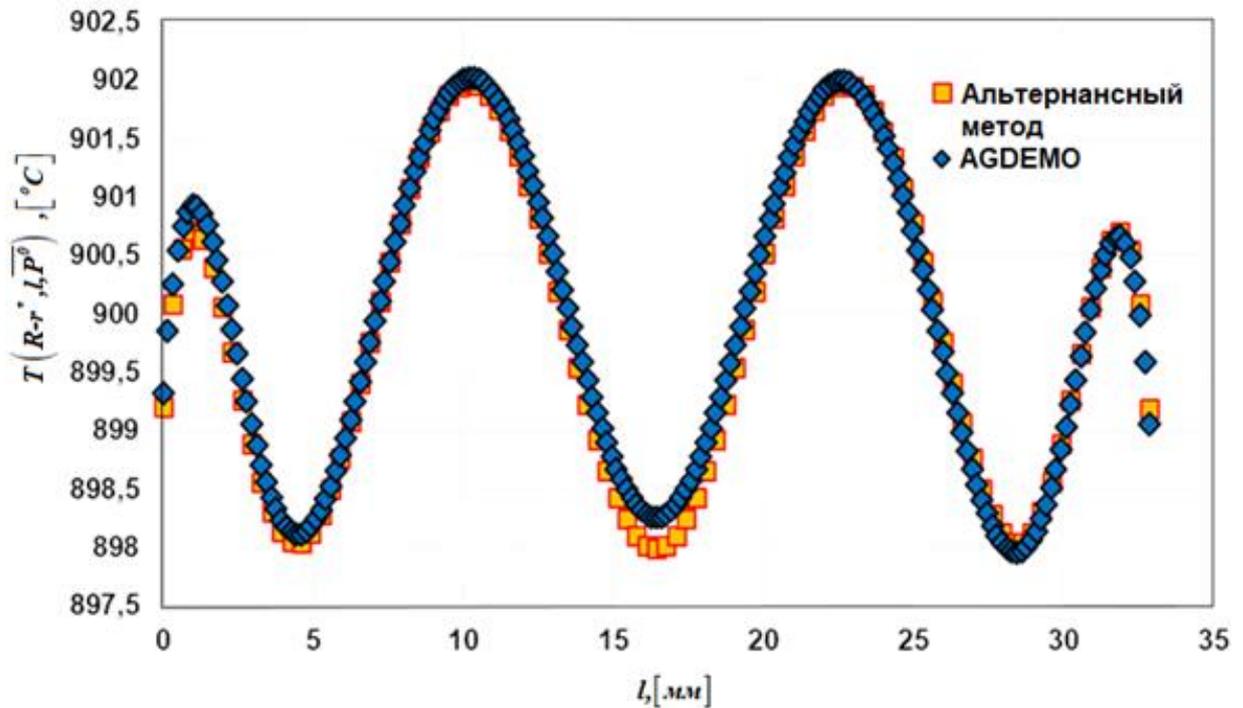


Рисунок 4.6 – Сравнение конечных температурных распределений для задачи оптимального проектирования

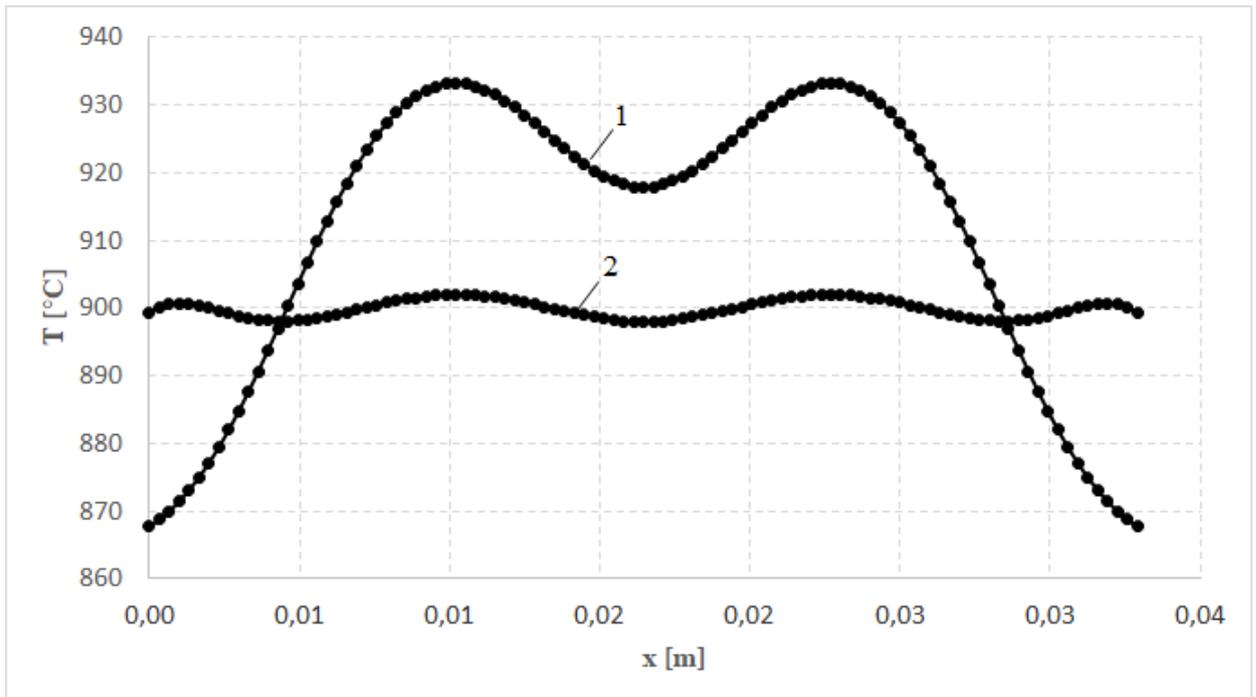
Анализ представленных конечных температурных распределений показывает, что оба метода оптимизации дают практически идентичные результаты. Максимальное абсолютное отклонение конечной температуры $T(R-r^*, l, t^0, P^0)$ от требуемого значения T^* не превышает 2°C . Незначительная разница отклонений максимальной и минимальной температуры от заданной обусловлено погрешностями численного решения системы уравнений.

Для анализа представленных результатов было также проведено сравнение с типовой конструкцией индукционной нагревательной установки, параметры которой представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Конструктивные параметры типового индуктора

Параметр	p_1	p_2	p_3	I
Значение	11 мм	3.5 мм	5 мм	1005 А

На рисунке 4.7 представлено сравнение конечных температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя толщиной 2 мм для оптимальных и типовых параметров индукционной установки.



1 – для типовой конструкции; 2 – для оптимальной конструкции индуктора
Рисунок 4.7 – Конечные температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя

На основе представленного сравнения можно сделать вывод, что при использовании типовой индукционной установки максимальное отклонение температуры от заданного значения достигает 33°C на торцах заготовки. Применение индуктора с найденными в результате решения задачи оптимального проектирования конструктивными параметрами позволяет сократить данное отклонение до 2°C, которое удовлетворяет самым жестким технологическим требованиям, предъявляемым к процессам поверхностной закалки.

4.3 Решение задачи оптимального проектирования в условиях интервальной неопределенности параметров процесса

В данном разделе главы решение сформулированной в разд. 2.1.1 задачи оптимального проектирования индуктора, представленного на рисунке 2.1, проводится в условиях интервальной неопределенности параметров процесса нагрева на основе разработанной в разд. 2.2.1 методики. Для численного решения задачи используется описанная в главе 3 процедура оптимизации.

Задача оптимального проектирования при неполной информации о параметрах процесса решается для численной двумерной нелинейной модели процесса индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок в двух-витковом индукторе, разработанной в программном пакете Altair FLUX (разд. 4.1).

В качестве компонентов вектора $\bar{\beta}$ не полностью определенных параметров в сформулированной в разделе 2.1.1 задаче выступают начальная температура заготовки T_0 и коэффициент конвективного или лучистого теплообмена с поверхности α .

Поскольку потери конвекцией описываются следующим выражением [20, 115]:

$$W = \alpha_k S (T - T_{окр.}), \quad (4.3)$$

где S - площадь поверхности, T - температура нагретого тела, $T_{окр.}$ - температура окружающей среды, а потери излучением – в свою очередь, выражением:

$$W = \alpha_u S (T^4 - T_{окр.}^4), \quad (4.4)$$

то при скоростном нагреве до высоких температур, которым характеризуется процесс закалки, наибольший вклад в общие тепловые потери вносит теплообмен излучением. Поэтому в дальнейшем будет рассмотрен ряд практически важных задач, в которых интервальная неопределенность учитывается при определении коэффициента лучистого теплообмена.

Рассмотрим задачу, в которой коэффициент теплоотдачи излучением и начальная температура заготовки задаются с точностью до следующих интервалов возможного изменения их значений:

$$0.75 \leq \alpha_u \leq 0.95; 15 \leq T_0 \leq 25. \quad (4.5)$$

При максимальном значении коэффициента теплоотдачи излучением и минимальном значении температуры из указанных интервалов (4.5) тепловые потери существенно увеличиваются, а при минимальном значении коэффициента теплоотдачи

излучением и максимальном значении температуры тепловые потери существенно уменьшаются, следовательно, для достижения заданной температуры необходимо расширить диапазон возможных значений тока источника питания нагревательной установки. Тогда ограничения на искомые конструктивные параметры, представляющие собой компоненты вектора \bar{P} , могут быть записаны в виде, аналогично (4.1) или (4.2):

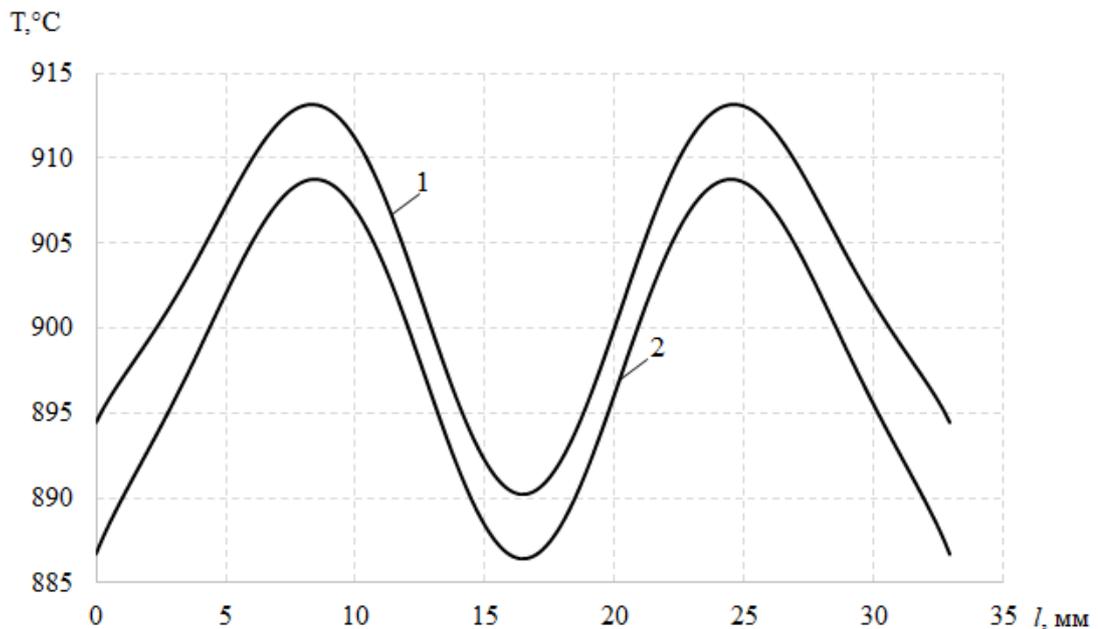
$$5 \leq p_1 \leq 15; 1 \leq p_2 \leq 10; 1 \leq p_3 \leq 15; 600 \leq I \leq 2000. \quad (4.6)$$

В результате применения автоматизированной процедуры оптимизации были получены оптимальные значения неизвестных конструктивных параметров, которые показаны в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Оптимальные значения параметров при $0.75 \leq \alpha_u \leq 0.95; 15 \leq T_0 \leq 25$

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$
Значение	11.8	3.3	4.6	1391	13.4

Температурные распределения для реализаций неопределенных факторов $\bar{\beta}_{\min} = (T_{0\min}; \alpha_{\max})$ и $\bar{\beta}_{\max} = (T_{0\max}; \alpha_{\min})$, соответствующих точкам минимума и максимума температуры показаны на рисунке 4.8.



1 – для реализации $\bar{\beta}_{\max} = (T_{0\max}; \alpha_{\min})$; 2 – для реализации $\bar{\beta}_{\min} = (T_{0\min}; \alpha_{\max})$

Рисунок 4.8- Температурные распределения в задаче оптимального проектирования при наличии интервальной неопределенности параметров $0.75 \leq \alpha_u \leq 0.95; 15 \leq T_0 \leq 25$

Из приведенных графиков видно, что максимальное абсолютное отклонение температуры вдоль границы закаливаемого слоя заготовки от заданного значения не превышает 13.5°C для обоих вариантов возможных реализаций неопределенных факторов.

Для оценки влияния коэффициента лучистого теплообмена на результаты решения задачи оптимального проектирования, диапазон возможных значений α_u в выражении (4.5) был увеличен:

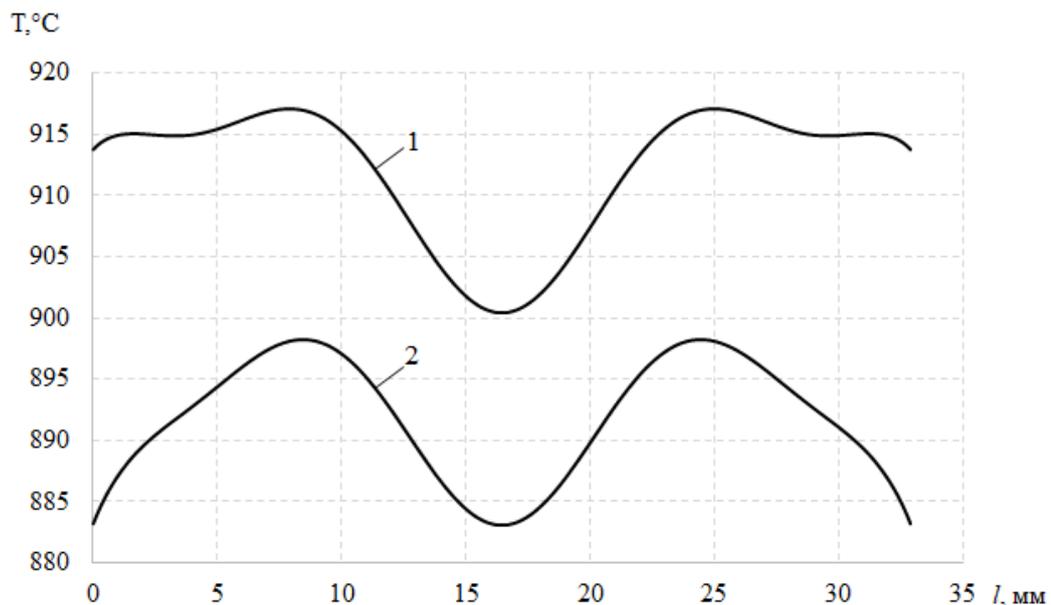
$$0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 15 \leq T_0 \leq 25. \quad (4.7)$$

Результаты, полученные при использовании автоматизированной процедуры оптимизации на базе альтернансного метода, сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 - Оптимальные значения параметров при $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 15 \leq T_0 \leq 25$

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$
Значение	12.2	3.6	4.1	1417	16.9

Температурные распределения для разных реализаций не полностью определенных параметров в рассматриваемом варианте постановки задачи показаны на рисунке 4.9.



1 – для реализации $\bar{\beta}_{\max} = (T_{0\max}; \alpha_{\min})$; 2 – для реализации $\bar{\beta}_{\min} = (T_{0\min}; \alpha_{\max})$

Рисунок 4.9- Температурные распределения в задаче оптимального проектирования при наличии интервальной неопределенности параметров $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 15 \leq T_0 \leq 25$

Анализ представленных результатов показывает, что расширение диапазона возможных значений коэффициента теплообмена излучением приводит к увеличению максимального отклонения температуры вдоль границы закаливаемого слоя заготовки от требуемого значения до величины 16.9°C , что по-прежнему соответствует технологическим требованиям, предъявляемым к процессам поверхностной закалки.

Исследуем теперь влияние начальной температуры изделия на решение задачи оптимального проектирования. Для этого рассмотрим следующие интервалы возможных значений неопределенных параметров процесса:

$$0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 10 \leq T_0 \leq 30. \quad (4.8)$$

Ограничения, накладываемые на оптимизируемые параметры вектора \bar{P} , имеют вид (4.6).

Результаты, полученные с помощью автоматизированной процедуры оптимизации, представлены в таблице 4.9.

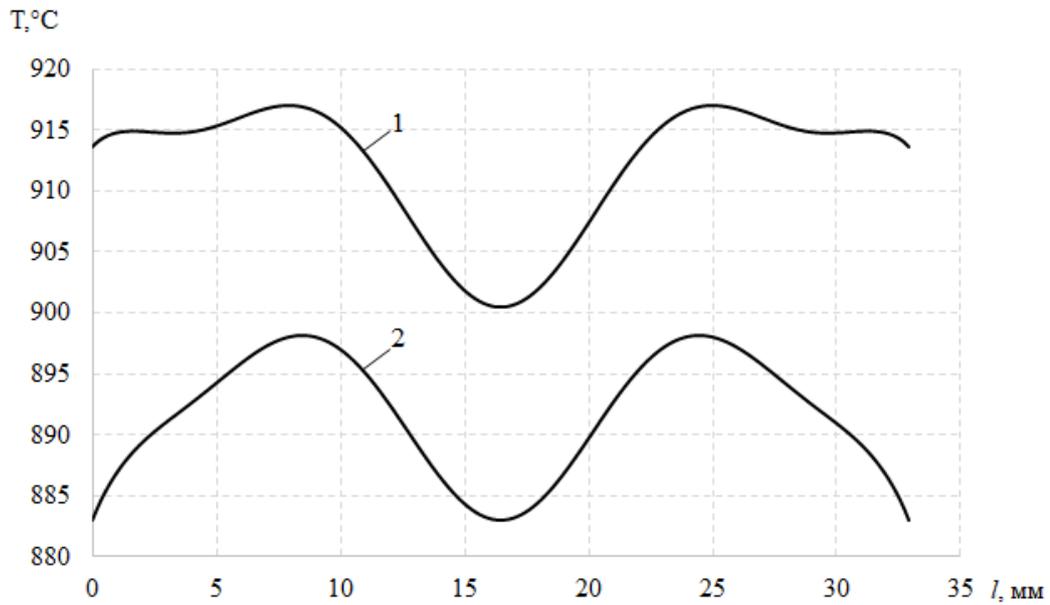
Таблица 4.9 - Оптимальные значения параметров при $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 10 \leq T_0 \leq 30$

Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$
Значение	12.2	3.7	4.1	1417	16.96

Температурные распределения для данного случая приведены на рисунке 4.10.

Представленные результаты показывают, что решение задачи с интервальной неопределенностью не приводит к снижению точности нагрева при расширении диапазона возможных значений начальной температуры обрабатываемой детали.

Таким образом, анализ приведенных численных результатов показывает, что решение на основе разработанной методики сформулированной задачи оптимального проектирования в условиях отсутствия полного объема информации (глава 2) позволяет обеспечить получение точности нагрева, соответствующей технологическим требованиям, предъявляемым к процессу поверхностного упрочнения, и при наличии интервальной неопределенности основных параметров, которые характеризуют первую стадию поверхностной закалки.



1 – для реализации $\bar{\beta}_{\max} = (T_{0\max}; \alpha_{\min})$; 2 – для реализации $\bar{\beta}_{\min} = (T_{0\min}; \alpha_{\max})$

Рисунок 4.10- Температурные распределения в задаче оптимального проектирования при наличии интервальной неопределенности параметров $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3$; $10 \leq T_0 \leq 30$

4.4 Решение задачи оптимального управления с учетом ограничения на максимально допустимую температуру заготовки

В данном разделе рассматривается решение сформулированной в разделе 2.1.2 задачи оптимального по быстродействию управления с фазовым ограничением на максимальную температуру заготовки на основе приведенного в разделе 2.2.2 алгоритма.

Согласно предложенному в разделе 2.2.2 алгоритму решения задачи оптимального по быстродействию управления, управляющее воздействие (2.35) по току источника питания, имеющее только один интервал нагрева, принимает следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} I_{\max}, & t \in [0; t_1]; \\ I_{oc}(t), & t \in (t_1; t_2]. \end{cases} \quad (4.9)$$

В выражении (4.9) t_1 - момент выхода максимальной температурой заготовки на ограничение, значение которого находится из уравнения $\max_{\substack{l \in [0; L] \\ r \in [0; R]}} T(r, l, t_1) = T_{\text{дон}}, I_{oc}(t)$ -

управление на особом участке движения по ограничению, аналогичное $u^T(t)$ в выражении (2.35), t_2 - момент окончания стадии нагрева.

В главе 2 показано, что алгоритм управления на особом участке $I_{oc}(t)$ может быть представлен с помощью кусочно-постоянной функции (рис. 4.11).

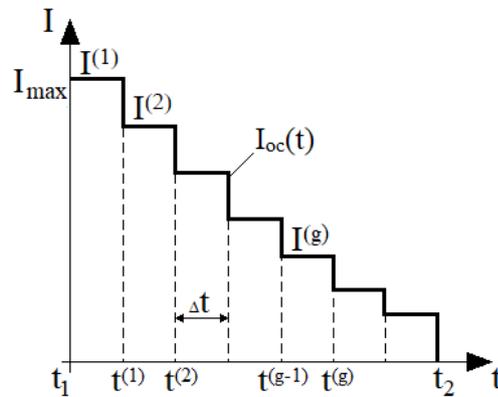


Рисунок 4.11 – Кусочно-постоянная аппроксимация управляющего воздействия $I_{oc}(t)$ на особом участке

В данной задаче предельно допустимая максимальная температура заготовки в процессе нагрева в ограничении (2.11) принималась равной $T_{дон} = 1050^\circ\text{C}$. На первом шаге решения задачи оптимального управления была произведена аппроксимация особого участка управления кусочно-постоянной функцией времени, показанной на рис. 4.8. Найденный в результате данной аппроксимации алгоритм управления представлен на рисунке 4.12 [82]. Значения конструктивных характеристик нагревателя приняты равными оптимальным значениям, полученным в результате решения задачи оптимального проектирования, представленным в таблице 4.3.

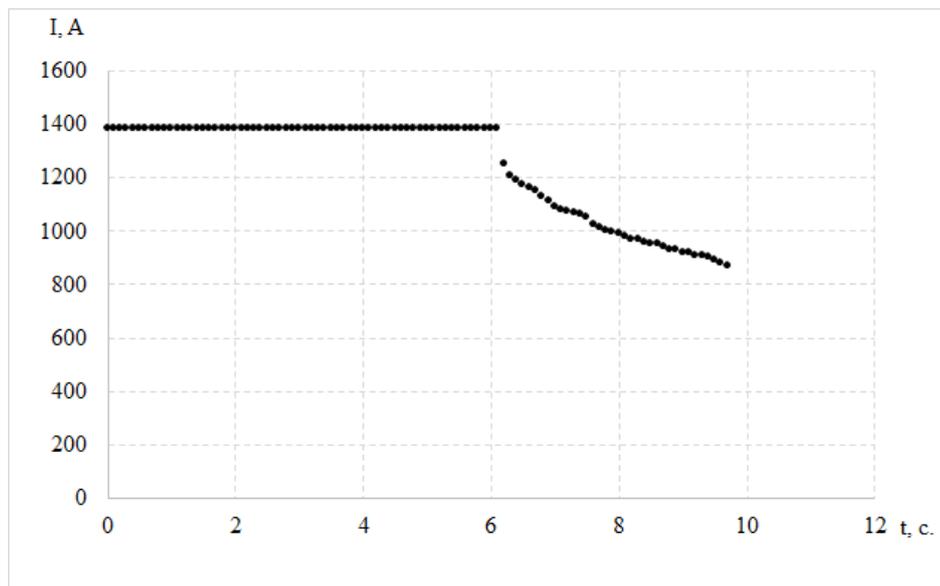


Рисунок 4.12 – Алгоритм управления, полученный с помощью кусочно-постоянной аппроксимации управляющего воздействия

Результующие температурные распределения в продольном сечении, соответствующем глубине закаливаемого слоя, и вдоль боковой поверхности заготовки в конце оптимального по быстрдействию процесса нагрева с учетом ограничения на максимально допустимую температуру представлены на рисунках 4.13 и 4.14 соответственно.

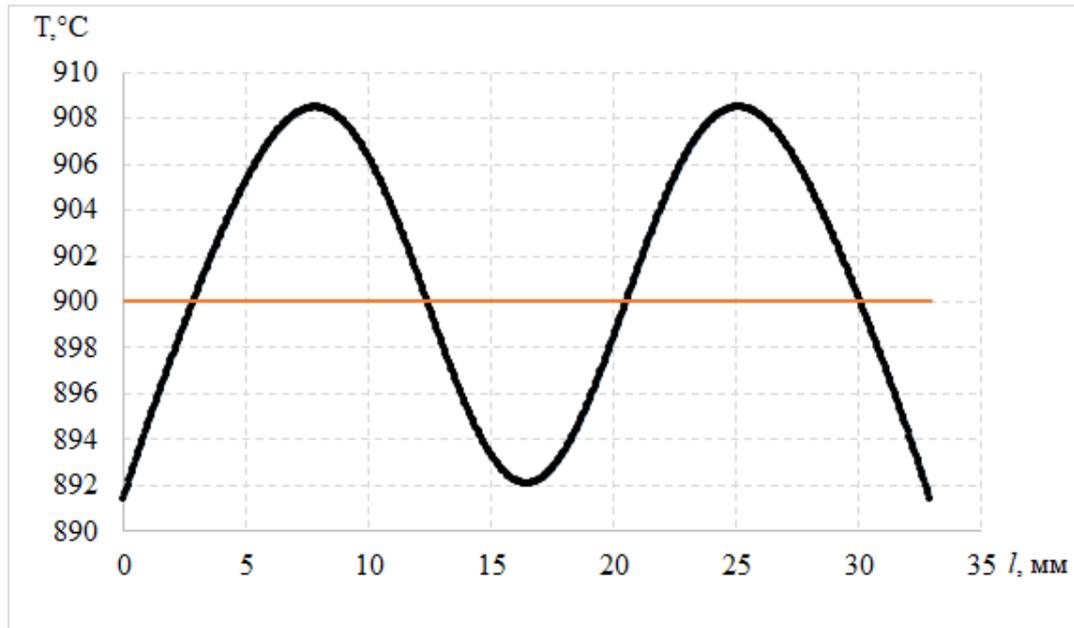


Рисунок 4.13 – Конечное температурное распределение в продольном сечении $r = R - r^*$

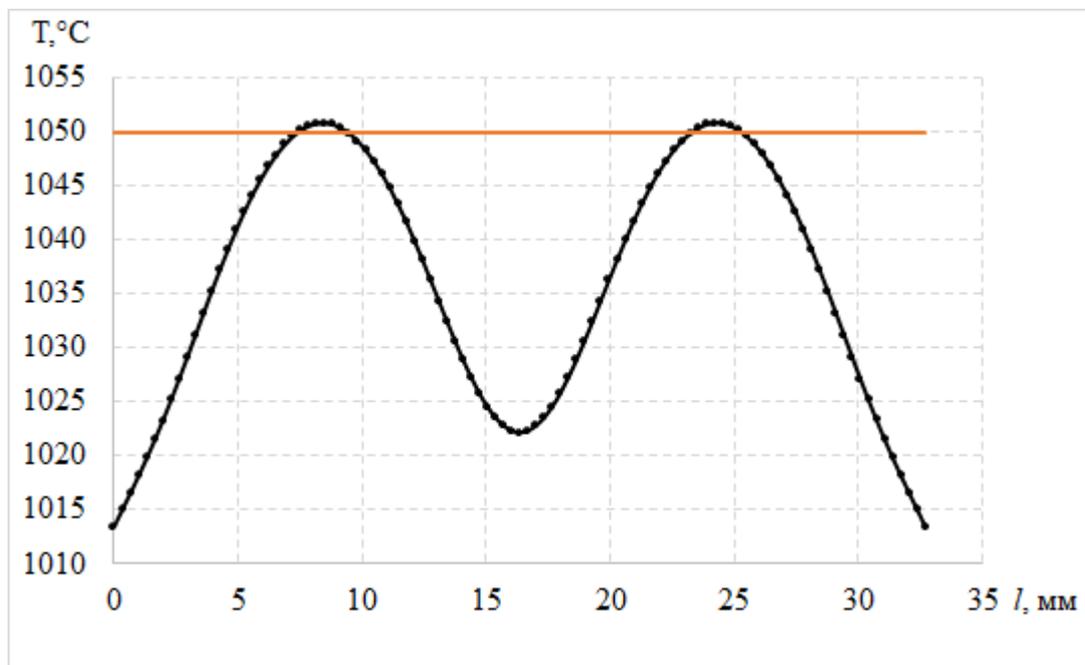


Рисунок 4.14 – Результирующее распределение температур вдоль боковой поверхности заготовки

Как видно из представленных результатов решения задачи оптимального управления на поверхности нагреваемой детали отсутствует перегрев, имевший место при решении задачи оптимального проектирования, приведенном в разделе 4.1. Максимальная температура в течение всей стадии нагрева не превышает заданного ограничения $T_{don} = 1050^\circ\text{C}$ более, чем на 1°C , что вызвано погрешностями численного расчета.

Для дальнейшей технической реализации найденного оптимального алгоритма управления необходимо провести аппроксимацию полученной кусочно-постоянной функции времени с помощью какой-либо непрерывной функции. С этой целью уже известный алгоритм на рисунке 4.12 был передан в инструмент Curve Fitting Tool программного пакета MATLAB [82, 109]. Данный модуль позволяет провести аппроксимацию экспериментальных данных с помощью различных функций, включая: степенные полиномы, экспоненциальные функции, функцию Фурье и Гаусса и другие.

В рассматриваемом случае лучшую точность по сравнению с другими функциями демонстрирует экспоненциальная зависимость вида:

$$I^T(t) = ae^{bt} + ce^{dt}. \quad (4.10)$$

Искомые параметры экспонент a, b, c, d определяются инструментом Curve Fitting Tool автоматически (рис. 4.15).

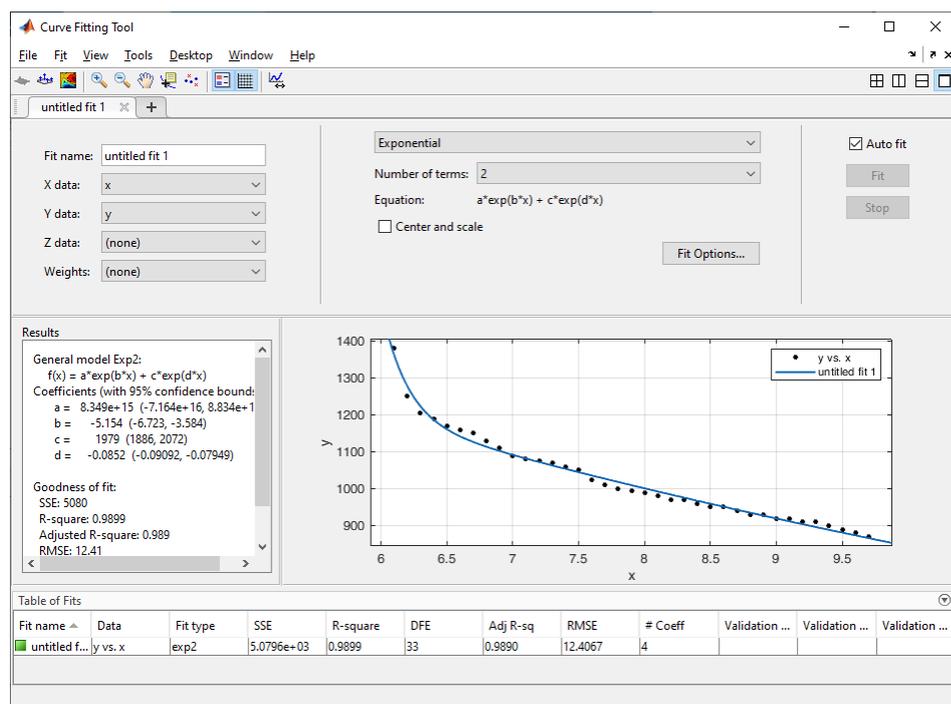


Рисунок 4.15 – Аппроксимация полученного кусочно-постоянного управления экспоненциальной функцией в Curve Fitting Tool

Таким образом, искомый алгоритм управления для задачи с ограничением на максимально допустимую температуру заготовки имеет следующий вид:

$$I(t) = \begin{cases} 1382A, & t \in [0; 6.1]; \\ 8.349 \cdot 10^{15} e^{(-5.154t)} + 1979e^{(-0.0852t)}, & t \in (6.1; 9.7]. \end{cases} \quad (4.11)$$

Время выхода максимальной температуры по объему закаливаемой заготовки на ограничение составило $t_1 = 6.1$ с., а общее время стадии нагрева $t_2 = 9.7$ с. (рис. 4.16).

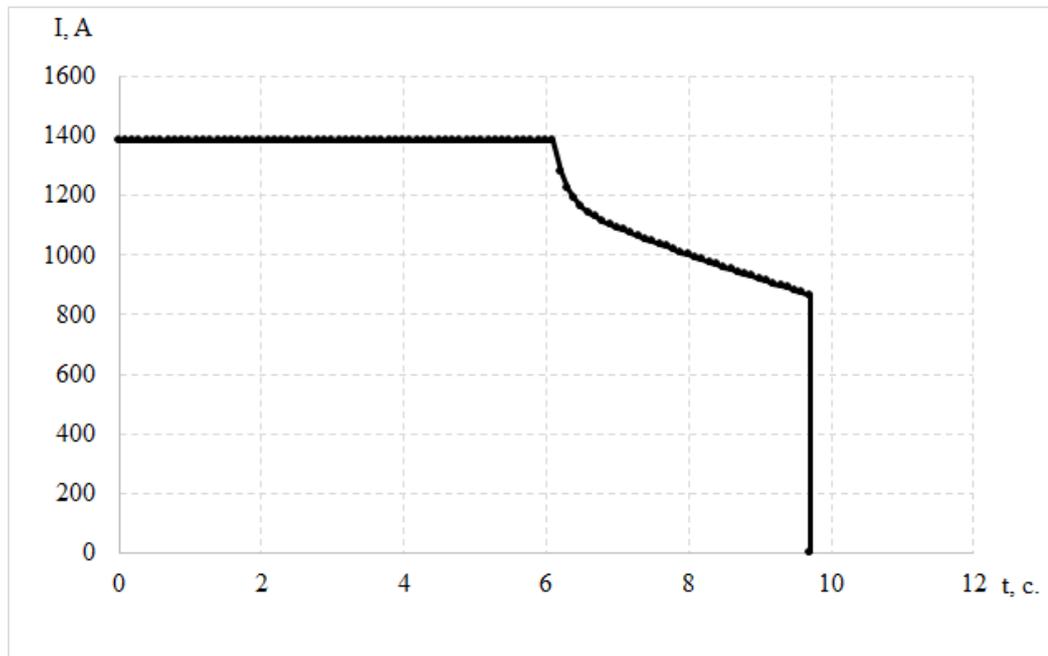


Рисунок 4.16 – Оптимальный алгоритм управления в процессе нагрева с ограничением на максимально допустимую температуру

4.5 Техническая реализация оптимального алгоритма управления с учетом ограничения на максимальную температуру заготовки

Современный рынок технических средств для построения промышленных систем автоматического управления позволяет осуществить техническую реализацию найденного в разделе 4.4 алгоритма оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру обрабатываемой детали. Поскольку полученная программа изменения управления представляет собой интервал нагрева с максимальным значением тока источника питания $I = 1382A$ и интервал движения по ограничению $I = 8.349 \cdot 10^{15} e^{(-5.154t)} + 1979e^{(-0.0852t)}$, переключение между которыми осуществляется при достижении максимальной температурой заготовки заданного допустимого значения, то при построении автоматической системы управления

необходимо предусмотреть контроль температуры поверхности изделия. Для этого целесообразно использовать бесконтактные пирометры с передачей данных по протоколу, который будет поддерживать выбранный контроллер. В качестве такого измерительного прибора может использоваться инфракрасный пирометр CellaTemp PA30, предназначенный для измерения температуры металлов и керамики в диапазоне от 500 до 2500°C (рис. 4.17) [116].

Характерной особенностью данного пирометра является наличие калибруемого аналогового выхода (0-20 мА), поддерживающего работу в сети с интерфейсом RS-485.



Рисунок 4.17 – Инфракрасный пирометр CellaTemp PA30

В качестве среды для программирования контроллера был выбран пакет Codesys v2.3 [117]. Данная программная среда позволяет разрабатывать программы на любом из существующих языков программирования ПЛК стандарта IEC 61131-3, а также создавать систему визуализации для панелей оператора. Одним из существенных достоинств данной программной среды является возможность использования персонального компьютера в режиме эмулирования реального ПЛК. Данная функция позволяет осуществить отладку созданного программного кода перед подключением к реальному оборудованию.

На первом шаге технической реализации было принято решение рассматривать FLUX-модель процесса, как объект управления, и персональный компьютер в режиме эмулирования работы ПЛК. В данном случае возникает проблема обмена данными между двумя программными пакетами, для решения которой было решено использовать библиотеку Simulink в качестве промежуточного звена подобного взаимодействия.

Существует несколько вариантов обмена данными в реальном времени между Codesys и Simulink. Одним из них является применение OPC технологии, использование которой предполагает настройку программной среды Codesys в качестве OPC-сервера и дальнейшее подключение к нему ПО MATLAB с помощью набора инструментов OPC Toolbox. Данный набор инструментов включает блоки конфигурирования OPC,

считывания значений переменных с заданного OPC-сервера и передачу в него данных, полученных в Simulink (рис. 4.18) [109].

Подключение программного пакета FLUX к библиотеке Simulink осуществляется с помощью клиент-серверной технологии, где в качестве сервера выступает ПО Altair FLUX, к которому в роли клиента подключается ПО MATLAB. Запуск FLUX-сервера в этом случае обеспечивается стандартным m-файлом, входящим в библиотеку FLUX. В Simulink-модели данный файл представлен блоком Interpreted MATLAB-function, который позволяет запускать m-файлы функции непосредственно в Simulink.

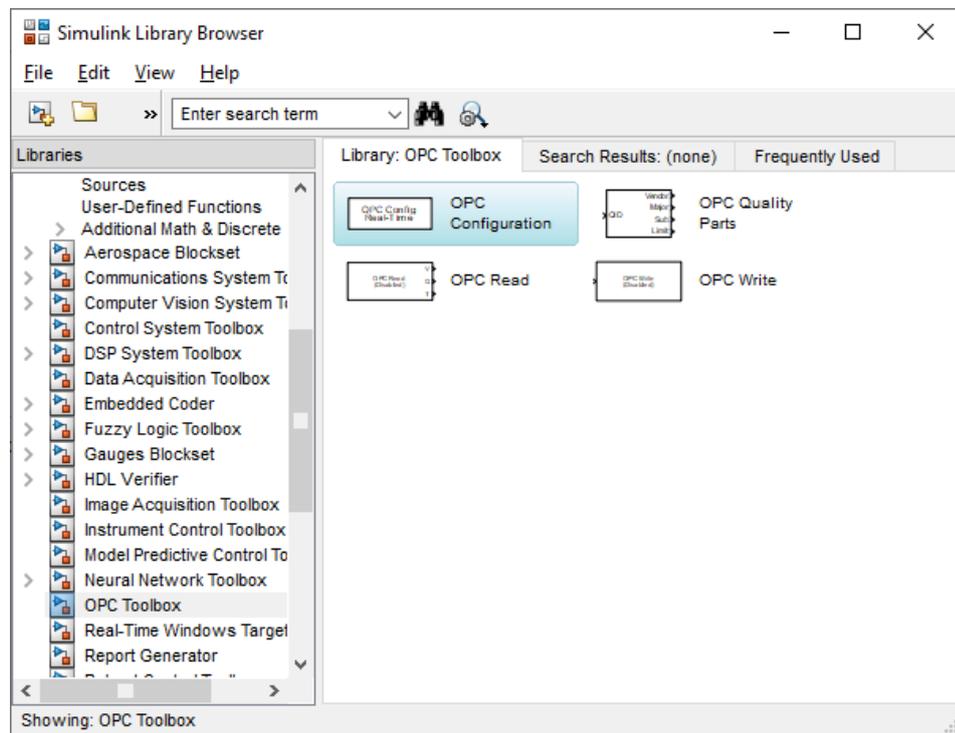


Рисунок 4.18 – Набор блоков инструмента OPC Toolbox

Таким образом, на каждом шаге расчета модели управляющее воздействие, формируемое в контроллере, будет передаваться в Simulink-модель объекта управления с помощью OPC-технологии, а затем и в FLUX-модель процесса. После этого происходит расчет одного временного шага FLUX-модели с переданным значением управляющего воздействия и передача полученного температурного распределения вдоль боковой поверхности заготовки обратно в Simulink. На последнем шаге в Simulink производится вычисление максимального значения температуры и передача его в контроллер, который в свою очередь рассчитывает новое значение управляющего воздействия, если температура поверхности достигла своего максимально допустимого значения.

Общий вид полученной Simulink-модели, а также внешний вид созданной в среде Codesys системы визуализации показаны на рисунках 4.19 и 4.20, соответственно.

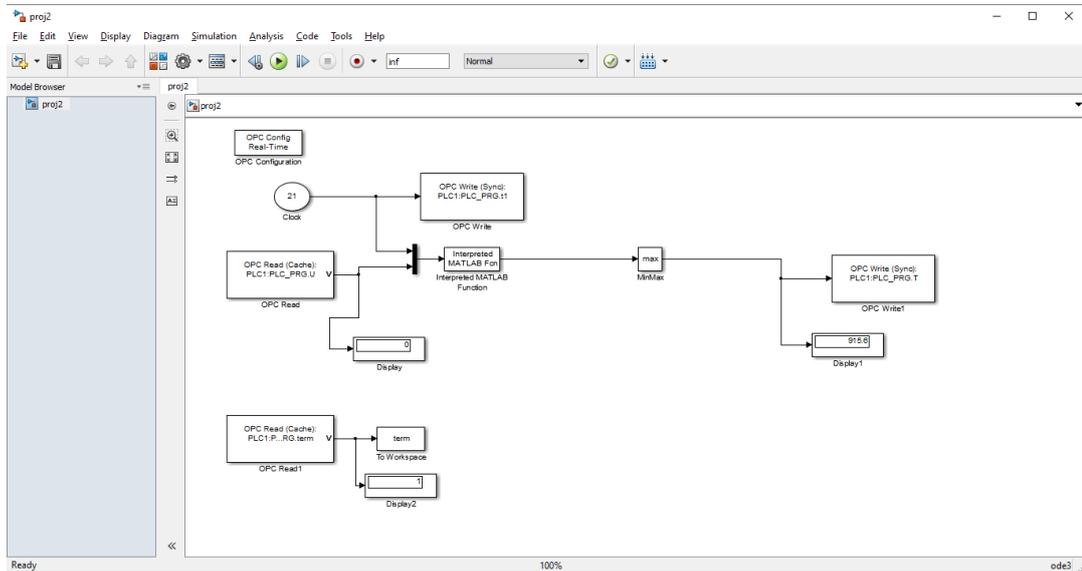


Рисунок 4.19 – Simulink-модель для технической реализации алгоритма оптимального управления с учетом ограничения на максимальную температуру

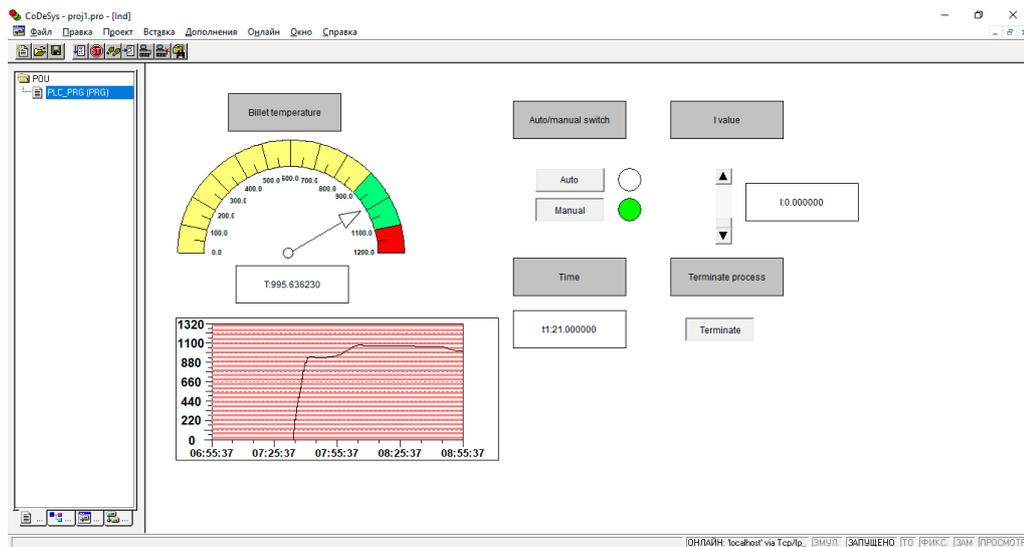


Рисунок 4.20 – Система визуализации Codesys

Программа контроллера написана таким образом, что при загрузке в индуктор новой заготовки, по умолчанию запускается автоматический режим, который реализует полученный алгоритм оптимального управления с учетом ограничения на максимальную температуру заготовки (4.11). После окончания процесса, контроллер автоматически переходит в ручной режим с нулевым значением управляющего воздействия. В этом режиме оператор имеет возможность в случае необходимости самостоятельно задавать требуемое значение управления. В течение всего процесса на

экране отображаются текущие значения времени процесса и максимальной температуры заготовки, а также сохраняется история изменения максимальной температуры во времени.

Как видно из рисунка 4.21 максимальная температура заготовки в течение всего процесса нагрева в автоматическом режиме не превышала своего допустимого значения. Температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя обрабатываемой детали в конце стадии нагрева при аппроксимации управляющего воздействия с помощью экспоненциальной функции практически совпадает с показанным на рисунке 4.13 результирующим температурным распределением, полученным при использовании кусочно-постоянного алгоритма управления.

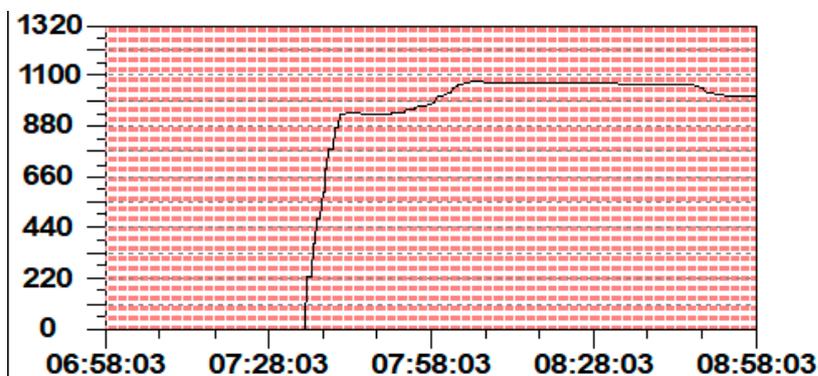


Рисунок 4.21 – История изменения максимальной температуры в Codesys

На следующем шаге технической реализации необходимо выбрать технические средства автоматизации, подходящие для рассматриваемого процесса. В данном случае основными требованиями к ПЛК являются: наличие аналоговых входов (для передачи значения максимальной температуры с инфракрасного датчика температуры) и выходов (для задания тока источника питания), малое время опроса аналогового входа, а также наличие интерфейса RS-485 для подключения выбранного пирометра. Всем этим требованиям удовлетворяет ПЛК150 компании ОВЕН (рис. 4.22а) [118].

Данный ПЛК имеет наличие интерфейса RS485, 6 дискретных входов, 4 дискретных выхода типа электромагнитного реле, а также 4 аналоговых входа и 2 аналоговых выхода. Время опроса одного выхода в данном контроллере составляет 0.5 секунды, что соответствует требованиям к быстродействию контроллера для данного процесса.

Существенным преимуществом данного контроллера является встроенная возможность связи с средой разработки Codesys, дополняемую индикатором на передней панели устройства.

В качестве панели оператора для реализации системы визуализации, разработанной в Codesys, предлагается использовать панель ОВЕН СП307-Б (рис. 4.22б) [119].



а) б)
а - ПЛК150; б - панелей оператора семейства ОВЕН СП3хх
Рисунок 4.22 – Вид средств автоматизации компании ОВЕН

4.6 Выводы по четвертой главе

1. Представлены результаты численного решения задачи оптимального проектирования индукционной установки для стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки стальных цилиндрических заготовок, полученные с помощью автоматизированной процедуры оптимизации на базе альтернансного метода. Показано сравнение полученных результатов с решениями, полученными методами AGDEMO и M-NSGA, а также с результатами нагрева в индукторе типовой конструкции. Анализ температурных распределений показывает, что использование индукционного нагревателя с оптимальными значениями конструктивных параметров позволяет уменьшить величину максимального абсолютного отклонения температуры вдоль границы закаливаемого слоя заготовки от требуемого значения с 33°C до 2°C по сравнению с нагревом в индукторе типового исполнения, а также совпадение решений, полученных альтернансным методом и методом AGDEMO, что подтверждает адекватность представленных результатов. Отмечено, что в конце стадии нагрева на поверхности изделия наблюдается существенный перегрев, недопустимый для

технологии поверхностной индукционной закалки, что обуславливает необходимость введения дополнительного ограничения на максимальную температуру заготовки и решения задачи оптимального по быстродействию управления с соответствующим фазовым ограничением.

2. Представлены результаты численного решения задачи оптимального проектирования индукционной установки в условиях наличия интервальной неопределенности коэффициента теплообмена и начальной температуры заготовки. Отмечено, что основной вклад в общие тепловые потери при скоростном нагреве выше точки Кюри, характерном для первой стадии процесса поверхностной индукционной закалки, вносит теплообмен излучением. Приведены и проанализированы результаты решения задачи с не полностью определенными параметрами стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки стальных заготовок, полученные с помощью автоматизированной процедуры оптимизации. Проведен анализ влияния задаваемого интервала значений начальной температуры и коэффициента тепловых потерь на результаты решения.

3. Приведены и проанализированы результаты решения задачи оптимального управления с учетом дополнительного фазового ограничения на максимальную температуру обрабатываемой заготовки. Анализ приведенных результирующих температурных распределений вдоль границы закаливаемого слоя и на поверхности изделия показывает, что при применении найденной программы изменения во времени управляющего воздействия по току источника питания максимальная температура детали не превышает заданного допустимого значения в течение всей рассматриваемой стадии нагрева.

4. Предложен вариант технической реализации найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления в задаче с фазовым ограничением на максимальную температуру заготовки. На первом шаге была использована программная среда Codesys в режиме эмулирования работы реального контроллера и численная FLUX модель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки в качестве объекта управления. В дальнейшем полученное программное оптимальное по быстродействию управление может быть реализовано на базе современных средств автоматизации компании ОВЕН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Рассмотрена технология поверхностной индукционной закалки стальных деталей и установлено, что основной целью стадии нагрева является получение максимально равномерного температурного поля в закаливаемом слое обрабатываемого изделия, получение которого невозможно при использовании типовых нагревателей и типовых режимов их функционирования. В связи с этим в общем виде формулируется актуальная задача оптимизации индукционной нагревательной установки, как объекта с распределенными параметрами. На основе приведенного анализа современных методов оптимизации установлено, что альтернативный метод параметрической оптимизации, обладает существенными преимуществами и позволяет получить точное решение как для изначально параметризованной задачи оптимального проектирования, так и для задачи оптимального управления после ее точной редукции к задаче математического программирования, чем обусловлено использование этого метода для разработки предлагаемых в диссертационной работе методик и алгоритмов.

2. На основе общей постановки задачи оптимизации индукционного нагревателя сформулированы задачи оптимального проектирования индуктора, реализующего стадию нагрева поверхностного упрочнения стальных цилиндрических заготовок, как при наличии полной информации об объекте, так и в условиях интервальной неопределенности начальной температуры детали и коэффициента теплообмена с поверхности изделия. Приведена постановка нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления стадией нагрева поверхностной закалки с ограничением на максимально допустимую температуру обрабатываемой детали и процедура её редукции к задаче математического программирования. Показано, что рассматриваемые задачи после параметризации представляют собой задачи полубесконечной оптимизации, которые могут быть решены на основе разработанных в диссертационном исследовании методик и алгоритмов.

3. Предложена новая методика решения сформулированных задач оптимального проектирования индукционной нагревательной установки с полной информацией об объекте и при наличии интервальной неопределенности основных параметров, обеспечивающая максимально достижимую точность нагрева

поверхностного слоя упрочняемой детали. Согласно представленной методике, решение рассматриваемых задач оптимизации конструкции индуктора можно свести к решению систем трансцендентных уравнений, замкнутых относительно всех искомым неизвестных параметров исследуемого процесса.

4. Разработан алгоритм решения сформулированной нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру заготовки. Согласно приведенному алгоритму оптимальная программа управления для данной задачи представляет собой интервал нагрева с максимальным из допустимых значений управляющего воздействия и особый участок движения по ограничению, который может быть аппроксимирован с помощью кусочно-постоянной функции времени.

5. Разработана численная двумерная нелинейная модель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки в конечно-элементном программном пакете Altair FLUX. Для анализа адекватности построенной модели проведена ее валидация на основе сравнения с результатами физического эксперимента на лабораторной нагревательной установке, сконструированной в Институте электротехнологий Университета имени Лейбница (г. Ганновер, Германия).

6. Разработана специализированная автоматизированная процедура параметрической оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционной нагревательной системы для поверхностной закалки в программном пакете MATLAB с интеграцией разработанной численной двумерной нелинейной FLUX модели процесса индукционного нагрева.

7. Приведены результаты численного решения сформулированных задач оптимального проектирования индукционной установки для стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки с полной информацией и с интервальной неопределенностью основных параметров, полученные с помощью автоматизированной процедуры оптимизации. Показано сравнение представленных результатов с решением, найденным при использовании метода AGDEMO и M-NSGA, а также с результатами нагрева в индукторе типовой конструкции. Анализ результатов подтвердил целесообразность оптимизации конструктивных параметров индуктора, а также совпадение решений, полученных альтернативным методом и методом AGDEMO.

8. Предложен вариант технической реализации найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления в задаче с фазовым ограничением на максимальную температуру заготовки. На первом этапе использовалась программная среда Codesys в режиме эмулирования работы реального контроллера и численная FLUX модель стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки в качестве объекта управления. На следующем этапе полученное программное оптимальное по быстродействию управление может быть реализовано на базе современных средств автоматизации компании ОВЕН.

Дальнейшим возможным направлением развития работы является исследование стадии охлаждения процесса поверхностной индукционной закалки стальных полуфабрикатов и учет влияния скорости охлаждения на величину термонапряжений.

Другим направлением может являться переход к рассмотрению более сложной геометрической формы обрабатываемых заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rudnev V.I. et al. Handbook of Induction Heating. – New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2003. – 797 p.
2. Лахтин Ю.М. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1983г. – 360 с.
3. М. Е. Блантер. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. – М.: Mashgiz, 1963. – 416 с.
4. ASM Handbook. Vol. 1. Properties and Selection-- Irons, Steels, and High-performance Alloys. – Russel Township:ASM International, 1990. – 1063 p.
5. G. Totten, M. Howes Steel Heat Treatment Handbook. – New York: Marcel Dekker, 1997. – 1204 p.
6. Физические основы электротермического упрочнения стали / Гриднев В.Н., Мешков Ю.Я., Ошкадеров С.П., Трефилов В.И. – Киев: Наукова думка, 1973. – 326 с.
7. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. – М.: Metallurgiya, 1982. – 128 с.
8. Новиков И.И. Теория термической обработки. – М.: Metallurgiya, 1978. – 392 с.
9. Демичев А.Д. Поверхностная закалка индукционным способом. – Л.: Машиностроение, 1979. – 80 с.
10. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali: Sprav. izd. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т. Т. II. Основы термической обработки / Под ред. Берштейна М.Л., Рахштадта А.Г. –М.: Metallurgiya, 1983. – 368 с.
11. Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: монография / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 273 с.
12. Кувалдин А.Б. Скоростной индукционный нагрев металлических цилиндрических заготовок с учетом термонапряжений и упруго-пластических свойств / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин // Электричество: Теорет. и науч.-практ журн. – 2002. - №6. – С. 30-36.
13. Кувалдин А.Б. Расчет скоростного индукционного нагрева заготовок и изделий с учетом термонапряжений / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин // Актуальные

проблемы теории и практики индукционного нагрева: материалы междунар. конф. / СПб ГЭУ «ЛЭТИ», ООО ВНИИТВЧ-ЭСТЕЛ. – СПб., 2005. – С. 110-117.

14. Hömberg, Dietmar & Sokolowski, Jan. (2003). Optimal Shape Design of Inductor Coils for Surface Hardening. // SIAM J. Control and Optimization. Vol. 42. pp. 1087-1117.

15. Клочкова Н.Н., Обухова А.В., Проценко А.Н. Оптимизация формы индуктора для закалки сферических поверхностей // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2017. - №3. - С. 61-65.

16. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева. - М.: Наука, 2012. – 309 с.

17. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. - М.: Металлургия, 1993. – 279 с.

18. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. - М.: Высшая школа, 2009. – 678 с.

19. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи / А.М. Вайнберг. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.

20. Лыков А.В. Теория теплопроводности/ А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967 – 599 с.

21. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

22. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отделение 1981. – 328 с.

23. Yu Pleshivtseva, E. Rapoport Optimal Control of Induction Heating Processes – CRC Press, Taylor & Francis Group: Florida, 2006. – 376 pp.

24. Коршиков С.Е. Оптимальное управление температурными режимами индукционного нагрева цилиндрических слитков с учетом технологических ограничений: Автореф. дис... канд. техн. наук – Самара, 2015 – 24 с.

25. Левин И.С. Синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта: Автореф. дис... канд. техн. наук – Самара, 2017 – 20 с.

26. E. Rapoport, Yu. Pleshivtseva Multi-Objective Control of Distributed Parameter Systems in the Case of Interval Uncertainty of the Plant Characteristics. OPTOELECTRONICS INSTRUMENTATION AND DATA PROCESSING №4. – New York: Springer, 2019. – pp. 317-330.
27. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 588 с.
28. Бутковский А.Г. Структурная теория распределённых систем. – М.: Наука, 1977. – 480 с.
29. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределёнными параметрами / А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
30. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределёнными параметрами/ А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1979. – 605 с.
31. Бутковский А.Г. Оптимальное управление нагревом металла / А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: Metallurgy, 1972. – 439 с.
32. Бутковский А.Г. Управление нагревом металла / А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: Metallurgy, 1981. – 271 с.
33. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1983.
34. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 296 с.
35. Маковский В.А. Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами. – М.: Metallurgy, 1971. – 384 с.
36. Дидук Г.А., Золотов О.И., Пустыльников Л.М. Специальные разделы теории автоматического регулирования и управления (Теория систем с распределенными параметрами). С предисловием А.Г. Бутковского. – СПб.: СЗТУ, 2000. – 172 с.
37. Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М.: Наука, 1978. – 476 с.
38. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. – М.: Наука, 1971. – 744 с.
39. Андреев Ю.Н. Оптимальное проектирование тепловых агрегатов / Ю.Н. Андреев. – М.: Машиностроение, 1983. – 229 с.

40. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 2003. – 615 с.
41. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.
42. Васильев Ф.П. Методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1981. – 400 с.
43. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
44. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. – М.: Мир, 1972. – 416 с.
45. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. – М.: Наука, 1975. – 528 с.
46. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
47. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. – М.: Наука, 1978. – 486 с.
48. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.4. Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егупова. – М.: МГТУ, 2004. – 741 с.
49. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
50. Автоматизированные производства изделий из композиционных материалов / В.С. Бплакирев, А.А. Большаков, А.В. Заев, И.Б. Зарецкий, В.А. Кощеев, В.И. Олексюк, Е.И.Фандеев – М.: Химия, 1990. – 240 с.
51. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. – М.: Наука, 2000. – 336 с.
52. Рапопорт Э.Я., Плешивцева Ю.Э. Проблемы и конструктивные методы прикладной теории управления техническими системами с распределенными параметрами // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции (3-6 сентября 2019 г. Самара). Т.1 – Самара. ООО «Офорт», 2019 – С.29-36.
53. Ким Д.П. Теория оптимального управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

54. Сиразетдинов Т.К. Оптимизация систем с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1977. – 480 с.
55. Теория автоматического управления / Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2003. – 566 с.
56. M. Schulze, A. Nikanorov, B. Nacke Hierarchical shape optimization of one-sided transverse flux heating induction coil // COMPEL-THE INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATION AND MATHEMATICS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. – W. Yorkshire: Emerald group, 2020, Vol. 39 No. 1. - Pp. 73-80.
57. Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Б., Никаноров А.Н., Попов А.В. Проектирование индукционных установок на основе решения задач многокритериальной оптимизации // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки: Научный журнал. – Самара: СамГТУ, 2016, №2(50). – С 47-57.
58. Yu. Pleshivtseva, M. Forzan, E. Sieni, A. Popov Multi-Objective Optimization of Induction Surface Hardening Process // Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'18). 2018, pp.3515-3520.
59. Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я., Наке Б., Никаноров А.Н., Попов А.В. Designing of induction heating systems based on three-criteria numerical optimization // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIX Международной конференции (12-15 сентября 2017 г. Самара, Россия) / Под ред.: акад. Е.А. Федосова, акад. Н.А. Кузнецова, проф. В.А. Виттиха. – Самара: ООО «Офорт», 2017. – 616 с. – С. 37-44.
60. M. Baldan, T. Steinberg, E. Baake Self-adaptive multimethod optimization applied to a tailored heating forging process. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **355** (2018) 012016.
61. Малый С.А. Экономичный нагрев металла. – М., Metallurgiya, 1967. – 191 с.
62. J. W. Zapata, T. A. Meynard Optimal Design of Inductors Based on Homothetic Shape and using Geometric Programming, 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe). - Genova, Italy, 2019. – Pp. 1-8.
63. A. Aliferov, P. Di Barba, F. Dughiero et al. Optimal design methods for the uniform heating of tube ends for stress relieving. // COMPEL-THE INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATION AND MATHEMATICS IN ELECTRICAL AND

ELECTRONIC ENGINEERING. – W. Yorkshire: Emerald group, 2020, Vol. 39 No. 1. - Pp. 12-20.

64. L. Jakubovicova, A. Gasparec, P. Kopas, et al. Optimization of the induction heating process in order to achieve uniform surface temperature // *PROCEDIA ENGINEERING*. – Elsevier, 2016, Vol. 136. – Pp. 125-131.

65. T. Leuca, S. Nagy, N. Trip et al. Optimal design for induction heating using genetic algorithms. *REVUE ROUMAINE DES SCIENCES TECHNIQUES-SERIE ELECTROTECHNIQUE ET ENERGETIQUE*, **60** (2015), pp. 133-142.

66. Обухова А.В., Клочкова Н.Н., Клочков А.А. Подход к оптимальному проектированию индукционной системы «индуктор-деталь» // *Научный альманах*. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания «Юком», 2019, №10-2(60). – с. 96-100.

67. Клочкова Н.Н., Обухова А.В., Обухова Ю.В. Проектирование индукционного нагревателя для нагрева осесимметричной заготовки // *Труды конференции «Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации» 28-29 апреля 2015 г.* – М.: Научно-издательский центр «Открытие», 2015. – С.68-71.

68. E. Rapoport, Yu. Pleshivtseva, B. Nacke et al Design and control of electrotechnological systems A multi-objective optimization approach. // *COMPEL-THE INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATION AND MATHEMATICS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING*. – W. Yorkshire: Emerald group, 2019. – pp. 239-247.

69. Демидович В.Б. Компьютерное моделирование и оптимальное проектирование энергосберегающих технологий индукционного нагрева металлов // *Известия РАН. Энергетика*. – М.: Издательство РАН, 2012. – С. 48-63.

70. Медникова В.А. Оптимальное проектирование индукционного нагревателя минимальной длины // *Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. Академика С.П. Королева*. – Самара: СГАУ, 2013, №2(40). - С. 103-112.

71. S. Galunin, M. Kudryash, K. Blinov et al. Numerical simulation and optimization of heater for induction hardening of leading wheel gear // *2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)*. – St. Petersburg, 2015. – pp. 192-195.

72. T. Kozulina, S. Galunin, K. Blinov et al. Numerical optimization of induction heating systems // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). – St. Petersburg, 2016. – pp. 621-624.
73. M. Belyaev, S. Galunin, V. Ishin, T. Kozulina Numerical simulation and optimization of heater for scanning induction hardening of shaft // 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). – St. Petersburg, 2016. – pp. 499-501.
74. S. Rhein, T. Utz, K. Graichen Dynamic optimization of multiphysics problems applied to induction heating processes. *At-Automatisierungstechnik*. **63** (2015). Pp. 713-726.
75. N. Barka, A. Chebak, J. Brousseau Optimization of Hardness Profile of Bearing Seating Heated by Induction Process Using Axisymmetric Simulation. *PIERS Online* **7** (2011). Pp. 316-320.
76. Базаров А.А. Моделирование и интегрированное проектирование систем индукционного нагрева сопряженных физически неоднородных объектов: Автореф. дис... канд. техн. наук – Самара, 2010 – 40 с.
77. Головачев А.Л. Разработка и исследование индукционных систем для ремонтно-восстановительных технологий роторов газотурбинных двигателей: Автореф. дис... канд. техн. наук – Самара, 2009 – 20 с.
78. Лепешкин С.А. Разработка индукторов и методики расчета эффективных режимов нагрева вращающихся дисков: Автореф. дис... канд. техн. наук – Москва, 2010 – 20 с.
79. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Дервянов М.Ю. Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия «Управление, вычисл. техн. информ.»*. – 2019. – № 1. – С. 40–50.
80. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Попова М.А., Дервянов М.Ю. Оптимальное проектирование нагревательной установки для индукционной поверхностной закалки // *Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 2 / под общ. ред. А.А. Большакова*. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 148 с. – С. 3-9.
81. Плешивцева Ю.Э., Попов А.В., Дьяконов А.И. Двумерная задача оптимального по типовым критериям качества управления процессом сквозного

индукционного нагрева // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки: Научный журнал. – Самара: СамГТУ, 2014, №2(42). – С 148-163.

82. A. Popov Optimization of Heating Stage for Induction Hardening of Cylindrical Billets // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). – Samara, Russia, 2019. - pp. 237-241.

83. Попов А.В. Оптимизация стадии нагрева в процессе индукционной закалки цилиндрических заготовок // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции (3-6 сентября 2019 г. Самара). Т.1 – Самара. ООО «Офорт», 2019 – С.92-97.

84. Попов А.В. Оптимальное проектирование индукционного нагревателя для поверхностной закалки в условиях интервальной неопределенности параметров// Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки: Научный журнал. – Самара: СамГТУ, 2020, Т. 28, №3. – С. 124-139.

85. Попов А.В., Дьяконов А.И. Оптимальное по быстродействию управление процессом периодического индукционного нагрева с учетом ограничения на максимальную температуру // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки: Научный журнал. – Самара: СамГТУ, 2015, №3(47). – С 56-68.

86. Шарапова О.Ю. Численное моделирование и оптимальное управление процессами индукционного нагрева цилиндрических заготовок под обработку давлением: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2011. 22 с.

87. Рапопорт Э.Я. Оптимальное по быстродействию управление нелинейными объектами технологической теплофизики / Э.Я. Рапопорт// Элементы и системы опт. идент. и упр. технолог. Процессом. – Тула, 1996. – С.81-91.

88. Метод конечных элементов: Пер. с фр. / Под. Ред. Н.Н. Яненко, - М.:Мир,1976. – 95 с.

89. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / Под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Мир, 1987. – 524 с.

90. Гаспарова, Л.Б. Использование метода конечных элементов при проектировании технологического оборудования : учеб. пособие / Л. Б. Гаспарова, О. Ю. Казакова; Самар.гос.техн.ун-т.- Самара, 2011.- 120 с.

91. Численные методы : учеб.и практикум для академ.бакалавриата / под ред. У. Г. Пирумова .- 5-е изд.,перераб.и доп..- М.: Юрайт, 2017.- 421 с.

92. Chari, M.V.K. (1970) *Finite element analysis of nonlinear magnetic fields in electric machines*, Ph.D. Diss., McGill University.
93. FEA Compare [Электронный ресурс]. URL: <http://www.feacompare.com/> (дата обращения 06.05.2020).
94. ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения 06.05.2020).
95. Simulia Abaqus [Электронный ресурс]. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> (дата обращения 06.05.2020).
96. Elcut [Электронный ресурс]. URL: <https://elcut.ru/> (дата обращения 06.05.2020).
97. COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения 06.05.2020).
98. Agros2D [Электронный ресурс]. URL: <http://www.agros2d.org/> (дата обращения 04.05.2020).
99. Elmer [Электронный ресурс]. URL: <https://www.csc.fi/web/elmer> (дата обращения 04.05.2020).
100. FREEFEM++ [Электронный ресурс]. URL: <http://www3.freefem.org/> (дата обращения 04.05.2020).
101. ONELAB [Электронный ресурс]. URL: <http://onelab.info/> (дата обращения 04.05.2020).
102. OPENFOAM [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openfoam.com/> (дата обращения 04.05.2020).
103. Altair FLUX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.altair.com/flux/> (дата обращения 15.09.2020).
104. Плешивцева Ю.Э. Сравнительный анализ программных продуктов ANSYS и Cedrat FLUX на примере моделирования проходной индукционной нагревательной установки / Ю.Э. Плешивцева, О.Ю. Шарапова, В.А. Медникова // XII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» – Самара, 2011. - С. 78-84.
105. Шарапова О.Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX //

Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки, 201., Вып.№7 (28). – С. 180 – 185.

106. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

107. Попов А.В. Оптимизация процессов индукционного нагрева с помощью комплексного использования пакетов моделирования FLUX и MATLAB. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29 [текст]: сб. трудов XXIX Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.12. / под общ.ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т; Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), СПбПУ, СПИИРАН; Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2016. – С. 60-67.

108. Yu. Pleshivtseva, G. Rogachev, A. Popov MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29, 02033 (2016).

109. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения 05.05.2020).

110. Yu. Pleshivtseva, B. Nacke, M. Baldan, A. Popov, E. Rapoport, A. Nikanorov Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening // Proceedings of international conference on heating by electromagnetic sources HES-19. – Padua, Italy, 2019. – pp. 165-170.

111. Yu. Pleshivtseva, B. Nacke, M. Baldan, A. Popov, E. Rapoport, A. Nikanorov Effective methods for optimal design of induction coils on example of surface hardening. // COMPEL-THE INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATION AND MATHEMATICS IN ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. Vol. 39 No. 1 – W. Yorkshire: Emerald group, 2020. – pp. 90-99.

112. B. Liu, A. Nikolaeva Efficient global optimization of MEMS based on surrogate model assisted evolutionary algorithm // Proceedings of the 2016 Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE), 2016. – pp. 555-558.

113. E. Sieni, P. Di Barba, M. Forzan Migration NSGA: method to improve a non-elitist searching of Pareto front, with application in magnetics // Inverse Problems in Science and Engineering, vol. 24, no. 4, 2016. – pp. 543-566.

114. P. Di Barba, M. E. Mognaschi, D. A. Lowther, J. K. Sykulski A Benchmark TEAM Problem for Multi-Objective Pareto Optimization of Electromagnetic Devices // IEEE Transactions on Magnetics, vol.54, no. 3, 2018. – pp. 1–4.

115. Теплопроводность и конвективный теплообмен: сб. ст. / АН УССР, Ин-т техн. теплофизики, отв. ред. В. И. Толубинский. – Киев: Наукова думка, 1980. – 106 с.

116. Keller [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keller.de/ru> (дата обращения 07.05.2020).

117. Codesys [Электронный ресурс]. URL: <https://www.codesys.com/> (дата обращения 07.05.2020).

118. ОВЕН ПЛК [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/product/plk100_150_154 (дата обращения 05.05.2020).

119. ОВЕН панели оператора [Электронный ресурс]. URL: <https://owen.ru/product/sp3xx> (дата обращения 05.05.2020).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Сравнение функциональных возможностей программных пакетов для конечно-элементного анализа

Таблица А.1 – Функциональные возможности конечно-элементных программных комплексов

№	Возможности	Коммерческие					Open-source				
		ANSYS	FLUX	Abaqus	Elcut	Comsol	Agros2D	Elmer	FreeFEM	ONELAB	OpenFOAM
1	Электромагнитный анализ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	Тепловой анализ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3	Взаимосвязанный анализ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	Моделирование движения	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+
5	Статический расчет	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	Динамический расчет	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
7	Наличие интерфейса для создания геометрии	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-
8	Моделирование в 2D	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
9	Моделирование в 3D	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+
10	Выбор типа конечного элемента	+	+	+	-	-	+	-	+	-	+

Продолжение таблицы А.1

№	Возможности	Коммерческие					Open-source				
		ANSYS	FLUX	Abaqus	Elcut	Comsol	Agros2D	Elmer	FreeFEM	ONELAB	OpenFOAM
11	Возможность задания нелинейных свойств материалов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
12	Возможность создания внешних электрических цепей	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-
13	Встроенная возможность интеграции в MATLAB	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка об использовании результатов кандидатской диссертации



Арконик Россия

Акционерное общество
«Арконик СМЗ»
(АО «Арконик СМЗ»)

ул. Алма-Атинская, 29, корп.33/34
г. Самара 443051 Россия

info.smz@arconic.com

Тел.: 8 846 278 34 12

Факс: 8 846 278 34 14

№ 800/501
« 11 » 09 2020

По месту требования

СПРАВКА

об использовании результатов

полученных в кандидатской диссертации А.В. Попова

«Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки»

Основные выводы и рекомендации, полученные в диссертации Попова Антона Валерьевича «Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использовались в процессе анализа технологии, разработки и проектирования систем автоматического управления процессами индукционного нагрева цилиндрических слитков из деформируемых алюминиевых сплавов перед последующими операциями горячего прессования на горизонтальных гидравлических прессах, что способствовало повышению производительности нагревательных установок и точности достижения требуемых температурных кондиций прессованных полуфабрикатов.

Директор по качеству и технологии

Иванченко А.В.



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ

Утверждаю:
 Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО «СамГТУ»
 профессор
 Юсупов Ю.В.
 «___» _____ 20__ г.



АКТ

научно-технической комиссии о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Попова Антона Валерьевича

«Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки».

Комиссия в составе д.т.н., зав. кафедрой УСАТСК Лившица М.Ю., к.т.н., доцента, зам. зав. кафедрой УСАТСК Дервянова М.Ю. и к.т.н., доцента Гавриловой А.А. составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в рамках научно-исследовательской работы Попова А.В., внедрены в учебный процесс на кафедре «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Результаты научных исследований, проведенных Поповым А.В., использованы при выполнении курсовых работ и при изучении учебных дисциплин: «Вычислительные методы и компьютерные технологии в управлении теплоэнергетическими системами» и «Синтез систем управления».

Реализация полученных автором результатов исследований позволила повысить эффективность и качество учебного процесса.

Заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», д.т.н., профессор



Лившиц М.Ю.

Зам. зав. кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», к.т.н., доцент



Дервянов М.Ю.

К.т.н., доцент кафедры УСАТСК



Гаврилова А.А.

Утверждаю:
 Проректор по учебной работе
 ФГБОУ ВО «СамГТУ»
 профессор
 Юсупова О.В.
 « 27.03.2020 г.



АКТ

научно-технической комиссии о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Попова Антона Валерьевича

«Оптимальное проектирование и управление режимами индукционного нагрева в процессе поверхностной закалки».

Комиссия в составе к.т.н., зав. кафедрой АУТС Колпащикова С.А., к.т.н., доцента, зам. зав. кафедрой АУТС Мандры А.Г., д.т.н., профессора Рогачева Г.Н. составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в рамках научно-исследовательской работы Попова А.В., внедрены в учебный процесс на кафедре «Автоматика и управление в технических системах» Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах».

Результаты научных исследований, проведенных Поповым А.В., использованы при выполнении курсовых работ и при изучении учебных дисциплин: «Оптимальное управление», «Методы оптимизации» и «Управление системами с распределенными параметрами».

Реализация полученных автором результатов исследований позволила повысить эффективность и качество учебного процесса.

Заведующий кафедрой «Автоматика
и управление в технических системах»,
к.т.н., доцент

Колпащиков С.А.

Зам. зав. кафедрой «Автоматика
и управление в технических системах»,
к.т.н., доцент

Мандра А.Г.

Д.т.н., профессор кафедры АУТС

Рогачев Г.Н.