

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)»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2020

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

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Плешивцева Юлия Эдгаровна

Официальные оппоненты: **Казаринов Лев Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» (г.
Челябинск), заведующий кафедрой «Автоматика и
управление»

Душин Сергей Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет (ЛЭТИ)» (г. Санкт-
Петербург), профессор кафедры «Автоматика и
процессы управления»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «НГТУ»), г. Новосибирск

Защита состоится 24 декабря 2020 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.217.07 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус,
ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного
технического университета по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Первомайская,
д. 18 и на сайте диссертационного совета Д 212.217.07 <http://d21221707.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью,
по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Самарский
государственный технический университет, Главный корпус, учёному секретарю
диссертационного совета Д 212.217.07,

тел. (846)337-05-45, email: 212.217.07@mail.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.07, кандидат
технических наук



Е.Е. Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 случаях, когда необходимо упрочнить только поверхностный слой изделия без изменения свойств сердцевины, применяется поверхностная индукционная закалка, наиболее типичным примером которой является упрочнение коленчатых и распределительных валов двигателей, шестерней или колец подшипников.

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

Первой операцией термической обработки для упрочнения железоуглеродистых сталей, является нагрев, обеспечивающий образование аустенита. Учет особенностей образования аустенита играет принципиальную роль на этапе обоснования требований к реализации технологии закалки и обуславливает необходимость обеспечения максимально равномерного распределения температуры в поверхностном слое изделия на стадии индукционного нагрева 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 распределения в упрочняемом слое оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревательных установок, изменение режимов функционирования которых также не приводит к возможности достижения заданных температурных кондиций. Существенной проблемой оказывается возможный перегрев поверхности заготовки при высокой скорости нагрева.

В этой связи особенно важными становятся задачи оптимального проектирования и управления режимами работы индукционной установки на стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, которые могут быть решены с помощью современных методов теории оптимального управления системами с распределенными параметрами.

Стадия нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, являющаяся объектом исследования в диссертационной работе, в общем случае описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений для электромагнитного и

теплового поля, для решения которой необходимо построить численную проблемно-ориентированную модель и интегрировать ее в оптимизационную процедуру.

Все перечисленное обуславливает актуальность задач, решению которых посвящено данное диссертационное исследование.

Степень разработанности темы исследования

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.

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.

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.

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.

Работа соответствует паспорту научной специальности 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы): п. №10 «методы синтеза специального математического обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистему АСУТП, АСУП, АСТПП и др.», п. №13 «теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

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 (п. №13 паспорта специальности 05.13.06).

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 (п. №13 паспорта специальности 05.13.06).

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 (п. №10 паспорта специальности 05.13.06).

Основные 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, методика 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 «Аркиник СМЗ», а также в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлениям 13.03.01 и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах» в ФГБОУ ВО «СамГТУ».

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 Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (2017 г., 2019 г., 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) и премией молодым ученым и конструкторам, работающим в Самарской области (Самара, 2020).

Публикации

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

Личный вклад автора

В работах [1-3, 5-7, 9-10, 12], опубликованных в соавторстве, автору принадлежит методика решения задач и результаты численных расчетов. Работы [4, 5, 8, 11] написаны единолично.

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 119 наименований и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, приводятся основные научные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены физические основы технологии поверхностной индукционной закалки стальных заготовок; показано, что на стадии индукционного нагрева необходимо обеспечить максимально равномерное распределение температуры в поверхностном слое изделия, что позволяет избежать появления на стадии закалочного охлаждения структурной неоднородности и разброса прочностных характеристик по глубине слоя, а также приводит к снижению (или исключению) вероятности возникновения критического уровня закалочных напряжений, способных привести к недопустимым дефектам типа трещин.

Показано, что для обеспечения требуемого температурного профиля в упрочняемом слое при исключении локальных перегревов оказывается недостаточным использование типовых индукционных нагревателей, изменение режимов функционирования которых также не приводит к достижению заданных температурных кондиций, что обуславливает необходимость постановки и решения задачи оптимизации конструктивных характеристик индуктора и его режимных параметров.

В общем виде сформулирована задача оптимизации индукционной нагревательной установки как объекта с распределенными параметрами (ОРП). Рассмотрена базовая математическая модель процесса индукционного нагрева, задаваемая взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье, описаны типовые критерии оптимальности, 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.

Проведен обзор основных методов оптимизации систем с распределенными параметрами (СРП), который позволил выявить их общие характеристики, основные особенности, главные преимущества и существенные недостатки, связанные с их использованием при решении задач оптимизации ОРП. 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.

Анализ степени разработанности темы исследования позволил определить содержательную постановку задачи диссертации, которая сводится к поиску

оптимальной конструкции нагревательной 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.

Во второй 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.

Взаимосвязанная система уравнений Максвелла и Фурье, описывающая в общем виде поведение электромагнитного и теплового полей в процессе индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок для рассматриваемой осесимметричной нагревательной системы (рис.1), может быть записана в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma(T) \bar{E}; \quad \operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0; \quad \operatorname{div} \bar{E} = 0; \quad (1)$$

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

с начальными и граничными условиями:

$$T(r, l, t) = T(r, l, 0) = T_0(r, l) = T_0 = \text{const}, \quad l \in [0; L], \quad r \in [0; R] \quad (3)$$

$$\frac{\partial H(0, l, t)}{\partial r} = 0; \quad H(R, l, t) = H_L; \quad H(r, 0, t) = H_{R1}; \quad H(r, L, t) = H_{R2}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(0, l, t)}{\partial r} = 0; \quad \lambda(T) \frac{\partial T(R, l, t)}{\partial r} = \alpha(T) (T(R, l, t) - T_a) \quad (5)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial l} = \alpha(T) (T(r, 0, t) - T_a); \quad \lambda(T) \frac{\partial T(r, L, t)}{\partial l} = \alpha(T) (T(r, L, t) - T_a). \quad (6)$$

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), 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.

В качестве оценки точности достижения заданного равномерного распределения температуры по границе закаливаемого слоя глубиной r^* предлагается выбрать

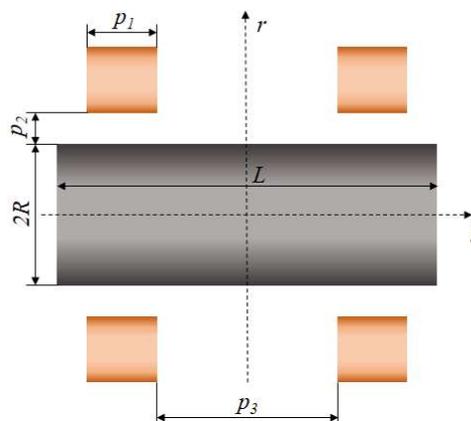


Рисунок 1 – Геометрия нагревательной системы

максимальную величину абсолютного отклонения температуры $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P})$ вдоль этой границы в конце стадии нагрева длительностью t^0 от заданного значения $T^* = 900^\circ\text{C}$. В соответствии с этим рассматривается минимаксный критерий оптимальности, обеспечивающий минимизацию данного отклонения:

$$J_1 = \max_{l \in [0, L]} |T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}) - T^*| \rightarrow \min_{\bar{P}}. \quad (7)$$

На значения оптимизируемых параметров вектора \bar{P} , к которым относятся размер квадратного сечения витка индуктора (p_1), расстояние между заготовкой и индуктором (p_2), расстояние между витками (p_3) (рис. 1) и ток источника питания ($p_4 = I = \text{const}$), накладываются следующие ограничения:

$$p_{1min} \leq p_1 \leq p_{1max}, p_{2min} \leq p_2 \leq p_{2max}, p_{3min} \leq p_3 \leq p_{3max}, I_{min} \leq I \leq I_{max}. \quad (8)$$

Таким образом, задача оптимального проектирования сводится к поиску таких значений оптимизируемых параметров $p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0$, стесненных ограничениями (8), которые обеспечивают за заданное время t^0 перевод объекта, описываемого уравнениями (1)-(2) с граничными условиями (4)-(6), из заданного начального (3) в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (7).

В случае существования интервальной неопределенности относительно ряда параметров процесса, которые задаются с точностью до возможного диапазона их изменения, минимизируемый критерий (7) принимает следующий вид:

$$J_2(\bar{P}) = \max_{\bar{\beta} \in \Omega} \left| \max_{l \in [0; L]} |T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}, \bar{\beta}) - T^*| \right| \rightarrow \min_{\bar{P}}, \quad (9)$$

где $\bar{\beta}$ - вектор параметров, к которым в частном случае относятся начальная температура заготовки $T_0 = \text{const}$ и коэффициент теплообмена α (учитывающий потери с поверхности заготовки конвекцией или излучением), заданные с точностью до известных интервалов их изменения $[T_{0min}; T_{0max}]$ и $[\alpha_{min}; \alpha_{max}]$, соответственно:

$$\bar{\beta} = (T_0, \alpha); \Omega: T_{0min} \leq T_0 \leq T_{0max}, \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}. \quad (10)$$

Следовательно, задача оптимального проектирования индуктора в условиях интервальной неопределенности сводится к поиску таких значений искомым параметров $p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0$, стесненных ограничениями (8), которые за заданное время t^0 обеспечивают перевод объекта, описываемого уравнениями (1)-(2) с граничными условиями (4)-(6), из заданного начального (3) в требуемое конечное состояние, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (9) в условиях наличия интервальной неопределенности, заданной условиями (10).

Сформулированные задачи оптимального проектирования индуктора как при наличии полной информации об объекте исследования, так и в условиях интервальной неопределенности его характеристик, могут быть решены с помощью предлагаемой в диссертации методики, которая позволяет распространить применение альтернативного метода параметрической оптимизации систем с распределенными параметрами на решение сформулированных задач.

В теории альтернансного метода показано, что если оптимальный по критерию (7) процесс индукционного нагрева характеризуется совокупностью N 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:

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \varepsilon_{\min}^{(3)} \dots > \varepsilon_{\min}^{(N)} > \varepsilon_{\min}^{(N+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(N^*)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0 \quad (11)$$

Доказано, что заданное число N неизвестных параметров процесса однозначно связано с неизвестным значением ε_0 следующим правилом:

$$N = S \text{ для всех } \varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(S)} \leq \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(S-1)}, \quad (12)$$

определяющим место ε_0 в (11) 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 задачи оптимального проектирования с полной информацией об объекте, отвечает пространственное температурное распределение по границе закаливаемого слоя заготовки $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ в конце стадии нагрева, соответствующее минимальному значению критерия оптимальности (7). Согласно альтернансному методу, основное свойство распределения $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ состоит в том, что число K точек l_j^0 в сечениях обрабатываемой заготовки при $r = R-r^*$, в которых достигаются предельно допустимые абсолютные отклонения конечной температуры от требуемого значения T^* , равные ε_0 , всегда оказывается не меньше числа N искомым оптимизируемых параметров процесса, причем эти отклонения $T(R-r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^*$ являются 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.

Кроме того, координаты некоторых $K_1 < K$ точек l_j^0 , в которых достигаются предельные отклонения температуры от заданной, неизвестны заранее и находятся в результате решения рассматриваемой задачи оптимизации. В этом случае, в этих точках с неизвестными координатами l_m^0 , $m = \overline{1, K_1} < K$ выполняются необходимые условия экстремума.

Учитывая все вышеизложенное, свойства результирующего температурного распределения $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ могут быть записаны в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} T(R-r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \psi \varepsilon_0, j = \overline{1, K}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0), \psi = \pm 1; \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L; K = \begin{cases} N, \text{ если } \varepsilon_{\min}^{(N)} < \varepsilon_0 < \varepsilon_{\min}^{(N-1)} \\ N+1, \text{ если } \varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_m^0, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m = \overline{1, K_1} < K, \end{cases} \quad (13)$$

которая 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 $\varepsilon_{\min}^{(N)}$, 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 $N=1$. Поскольку форма кривой результирующего температурного распределения по границе закаливаемого слоя $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}^0)$ предполагает наличие одного экстремума и двух точек максимального отклонения температуры от заданной, то для точности нагрева $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, согласно (13), получаем систему уравнений, замкнутую относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым в этом случае относятся p_1^0, l_2^0 и $\varepsilon_{\min}^{(1)}$.

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 решается 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. Системы уравнений для указанных значений точности записываются в соответствии с (13).

3. В частном случае сформулированной задачи оптимизации конструкции индукционного нагревателя (рис. 1), вектор 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. Тогда, с учетом известной конфигурации оптимального распределения температуры по объему заготовки в конце оптимального процесса нагрева, система уравнений альтернансного метода (13) для данного случая принимает следующий вид:

$$\begin{cases} T(R-r^*, l_j^0, t^0, \bar{P}^0) - T^* = (-1)^j \varepsilon_{\min}^{(4)}, j = \overline{1, 5}, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, p_3^0, p_4^0); \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < l_3^0 < l_4^0 < l_5^0 \leq L; \\ \frac{\partial T(R-r^*, l_m^0, t^0, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m = \overline{2, 4}. \end{cases} \quad (14)$$

Альтернансные свойства результирующего температурного распределения по границе закаливаемого слоя, записанные в виде (13) для задачи с полной информацией, распространяются и на сформулированную задачу с интервальной неопределенностью вектора параметров $\bar{\beta}$. Специфической особенностью данной задачи является то, что функция $T(R-r^*, l, t^0, \bar{P}, \bar{\beta})$ представляет собой для каждого вектора \bar{P} совокупность температурных распределений по пространственной

координате l для всех возможных реализаций неопределенных факторов T_0 и α . Это означает, что температурным минимумам и максимумам соответствуют разные комбинации реализаций возможных значений неопределенных факторов $\bar{\beta}_{\min}, \bar{\beta}_{\max}$, соответственно. Причем, $\bar{\beta}_{\min}$ включает минимальную начальную температуру заготовки $T_{0\min}$ и максимальный коэффициент тепловых потерь α_{\max} , а $\bar{\beta}_{\max}$, в свою очередь, – максимальную начальную температуру $T_{0\max}$ и минимальный коэффициент потерь α_{\min} .

Пусть для данной задачи максимальная точность нагрева заготовки, достижимая в классе задач с j оптимизируемыми параметрами на всем множестве допустимых реализаций значений начальной температуры и коэффициента тепловых потерь, обозначается через величину $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)}$, $j = \overline{1, N^*}$. Тогда в ряду неравенств (11) каждая из величин $\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)}$ будет определяться выражением:

$$\bar{\varepsilon}_{\min}^{(j)} = \min_P \left[\max_{\beta, l} \left| T(R - r^*, l, \bar{\beta}, \bar{P}) - T^* \right| \right], l \in [0; L]. \quad (15)$$

Вышеизложенное позволяет записать следующую систему уравнений, аналогичную системе (13) в задаче с полной информацией об объекте:

$$\begin{cases} T(R - r^*, l_a^0, t^0, \bar{\beta}_{\min}, \bar{P}^0) - T^* = -\bar{\varepsilon}_0, a = 1, 3, 5, \dots, \bar{P}^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_N^0); \\ T(R - r^*, l_b^0, t^0, \bar{\beta}_{\max}, \bar{P}^0) - T^* = \bar{\varepsilon}_0, b = 2, 4, 6, \dots, a + b = K; \\ 0 \leq l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_K^0 \leq L; K = \begin{cases} N, & \text{если } \bar{\varepsilon}_{\min}^{(N)} < \bar{\varepsilon}_0 < \bar{\varepsilon}_{\min}^{(N-1)} \\ N + 1, & \text{если } \bar{\varepsilon}_0 = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(N)} \end{cases}; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_m^0, t^0, \bar{\beta}_{\min}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; \frac{\partial T(R - r^*, l_p^0, t^0, \bar{\beta}_{\max}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0; m + p = K_1 < K. \end{cases} \quad (16)$$

При этом методика решения задачи оптимального проектирования с полной информацией об объекте остается справедливой и для рассматриваемой задачи с интервальной неопределенностью характеристик объекта.

Тогда, согласно (16), для рассматриваемого случая поиска четырех неизвестных конструктивных параметров нагревателя можно составить расчетную систему уравнений, подобную рассмотренной выше системе (14):

$$\begin{cases} T(R - r^*, l_i^0, t^0, T_{0\min}, \alpha_{\max}, \bar{P}^0) - T^* = -\bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}, i = 1, 3, 5; \\ T(R - r^*, l_j^0, t^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, \bar{P}^0) - T^* = \bar{\varepsilon}_{\min}^{(4)}, j = 2, 4; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_3^0, t^0, T_{0\min}, \alpha_{\max}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0, 0 = l_1^0 < l_2^0 < \dots < l_5^0 = L; \\ \frac{\partial T(R - r^*, l_k^0, t^0, T_{0\max}, \alpha_{\min}, \bar{P}^0)}{\partial l} = 0, k = \overline{2, 4}. \end{cases} \quad (17)$$

Системы (14), (17) являются замкнутыми относительно всех неизвестных параметров процесса, к которым относятся: четыре компонента вектора

оптимизируемых конструктивных параметров $\overline{P^0}$, три координаты точек с максимальным отклонением температуры от заданной l_2^0, l_3^0, l_4^0 и значение точности нагрева $\overline{\varepsilon}_{\min}^{(4)}$.

Технология индукционного нагрева накладывает ряд технологических ограничений на поведение температурного поля заготовки, к которым преимущественно относятся ограничения на максимальную температуру по объему заготовки или максимальные растягивающие термонапряжения.

Поскольку процесс закалки реализуется при высокой скорости нагрева до температур выше точки Кюри, существенно проблемой становится возможный перегрев поверхности заготовки, который можно избежать путём решения задачи оптимального по быстродействию управления с учётом ограничения на максимальную температуру поверхности заготовки:

$$T_{\max}(t) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} T(r, l, t) \leq T_{\text{дон}}; \quad 0 \leq t \leq t^0. \quad (18)$$

Требования к конечному температурному распределению вдоль границы закаливаемого слоя заготовки при формулировке задачи оптимального по быстродействию управления могут быть записаны в виде:

$$\max_{l \in [0; L]} |T(R - r^*, l, t^0) - T^*| \leq \varepsilon_0, \quad (19)$$

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

В работе формулируется задача поиска оптимальной программы изменения во времени сосредоточенного управляющего воздействия $u^*(t)$ током источника питания индукционного нагревателя, стесненного ограничениями (8), которое обеспечивает перевод объекта (1) – (2), (4) – (6) из заданного начального (3) в требуемое конечное состояние (19) за минимальное время в условиях выполнения фазового ограничения (18).

Показано, что для сформулированной нелинейной двумерной задачи оптимального управления остается справедливым вывод о том, что оптимальное по быстродействию управление $u^*(t)$ имеет вид кусочно-постоянной функции, заданной с точностью до вектора $\Delta = (\Delta_i), i = \overline{1, N}$ её неизвестных параметров, которые представляют собой длительности интервалов постоянства:

$$u^*(t) = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + (-1)^{j+1} \right], t_{j-1} < \Delta_j < t_j, j = 1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

где t_j - момент окончания j -ого интервала.

Тогда при параметризованном представлении управляющего воздействия в виде (20) задача оптимального по быстродействию управления сводится к задаче математического программирования на минимум целевой функции (22) N переменных Δ_j с ограничением на множество допустимых значений Δ_j в форме неравенств (21) и ограничением на максимально допустимую температуру нагреваемого изделия (23), которая может быть решена с помощью алгоритма, основанного на использовании альтернативного метода параметрической оптимизации.

$$\Phi(\Delta) = \max_{l \in [0; L]} |T(R - r^*, l, \Delta) - T^*| \leq \varepsilon_0, \quad (21)$$

$$I(\Delta) = \sum_{i=1}^N \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta}. \quad (22)$$

$$T_{\max}(\Delta) = \max_{\substack{r \in [0; R] \\ l \in [0; L]}} T(r, l, \Delta) \leq T_{\text{don}}. \quad (23)$$

Предложен алгоритм решения сформулированной задачи оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру заготовки на базе альтернативного метода, согласно которому при превышении предельно допустимого значения T_{don} управляющее воздействие в условиях ограничения (18) принимает вместо (20) следующий вид:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, t \in (0, t_T); \\ u^T(t), t \in [t_T; \Delta_1^0]; \\ \frac{u_{\max}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], \\ \Delta_{j-1}^0 \leq t < \Delta_j^0, j = \overline{2, N}, \end{cases} \quad (24)$$

где t_T - момент, при котором T_{\max} становится равной допустимому значению T_{don} ; u^T - управляющее воздействие на участке движения по ограничению.

Алгоритм решения 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 (24). В рассматриваемом частном случае задача сформулирована для стадии нагрева поверхностной индукционной заковки, в течение которой заготовка непрерывно нагревается в индукторе при максимальном токе источника питания из заданного диапазона его допустимых значений (8). Последующие чередующиеся интервалы нагрева и выравнивания температуры в (24) отсутствуют, поэтому управляющее воздействие может быть записано в следующем виде:

$$u^*(t) = \begin{cases} u_{\max}, t \in (0, t_T); \\ u^T(t), t \in [t_T; \Delta_1^0]. \end{cases} \quad (25)$$

2. На втором этапе устанавливается конкретный вид управления на особом участке движения по ограничению $u^T(t)$. При небольшой длительности нагрева можно пренебречь смещением температурного максимума 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} :

$$u^T(t) \cong a + be^{-c(t-t_T)}; t \in [t_T; \Delta_1^0] \quad (26)$$

В этом случае алгоритм оптимального управления примет форму, показанную на рисунке 2.

3. В случае, когда длительность нагрева существенна, найденное согласно (26) управление на особом участке уже не обеспечивает стабилизацию максимума температуры по объёму нагреваемой заготовки на допустимом уровне T_{don} . В этом случае используется аппроксимация искомого управляющего воздействия $u^T(t)$ кусочно-постоянной функцией времени (рис. 3).

Подобная аппроксимация управления на особом участке сводится к итерационной процедуре поиска на каждом временном шаге Δt значения управляющего воздействия $u^{(g)}, g = \overline{1, J}$, при котором выполняется следующее условие:

$$T_{\max}(t) = T_{don} \quad (27)$$

в моменты времени $t^{(1)}, t^{(2)}, \dots, t^{(J)}$, где $t^{(g)} = t_T + g \cdot \Delta t$. 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 определяется время окончания стадии нагрева для данной задачи оптимального управления. Поскольку главной целью первой стадии поверхностного упрочнения является нагрев закаливаемого слоя 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 (27) примет форму, представленную на рисунке 4.

Температуры в приведённых системах уравнений (14) и (17) и уравнении (27) находятся в результате численного решения нелинейной системы уравнений Максвелла и Фурье (1)-(6), что существенно усложняет решение задачи и обуславливает необходимость разработки автоматизированной оптимизационной процедуры с возможностью интеграции численной модели.

В третьей главе приведен подробный анализ современных средств моделирования взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей, на основе которого для построения численной модели рассматриваемой стадии нагрева

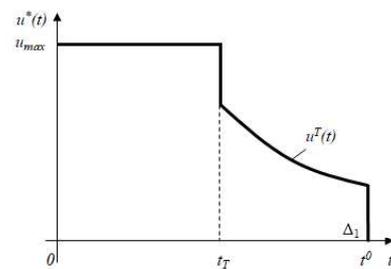


Рисунок 2 – Форма оптимального по быстродействию алгоритма управления

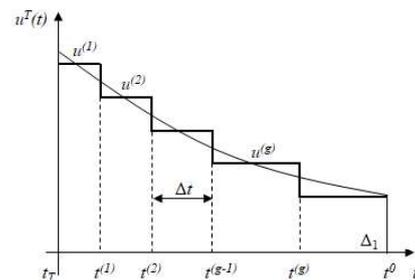


Рисунок 3 – Кусочно-постоянная аппроксимация управления $u^T(t)$

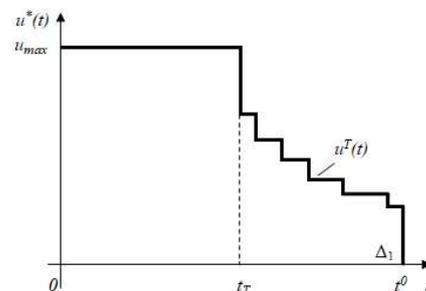


Рисунок 4 - Форма оптимального по быстродействию алгоритма управления при аппроксимации $u^T(t)$ кусочно-постоянной функцией

процесса поверхностной индукционной закалки был выбран коммерческий пакет Altair FLUX.

Рассмотрен процесс построения проблемно-ориентированной численной нелинейной модели индукционной нагревательной системы в программном пакете FLUX. Представлен алгоритм моделирования, который используется при разработке двумерной численной нелинейной модели рассматриваемой в диссертационной работе стадии нагрева процесса поверхностной индукционной закалки, исходные данные для которой приведены в таблице 1.

Разработанная модель с наложенной конечно-элементной сеткой имеет вид, показанный на рисунке 5.

Таблица 1 – Исходные данные для построения модели индукционной системы

Параметр	Значение
Частота питающего тока	100000 Гц
Требуемая температура заготовки	900°С
Температура окружающей среды	20°С
Начальная температура заготовки	20°С
Количество витков индуктора	2
Радиус заготовки	14 мм
Длина заготовки	32.9 мм
Время нагрева	10 с
Толщина закаливаемого слоя	4 мм
Материал заготовки	Сталь (С40)

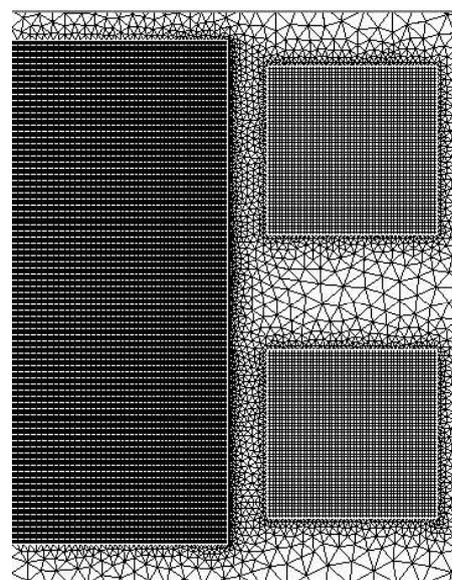


Рисунок 5 – Вид численной FLUX модели с конечно-элементной сеткой

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 лабораторной нагревательной установке, сконструированной в Институте электротехнологий Университета имени Лейбница (г. Ганновер, Германия).

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 численного 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 (рис. 6).



Рисунок 6 - Автоматизированная процедура оптимизации, основанная на совместном использовании пакетов FLUX и Matlab

В четвертой главе рассматривается численное решение сформулированных во второй главе 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 во второй главе методики и алгоритма. Численные результаты решения рассматриваемых задач получены с помощью разработанной в третьей главе специализированной процедуры оптимизации.

На оптимизируемые параметры вектора \bar{P} накладываются следующие ограничения вида (8):

$$5 \leq p_1 \leq 15, 2 \leq p_2 \leq 10, 3 \leq p_3 \leq 15, 500 \leq I \leq 1500. \quad (28)$$

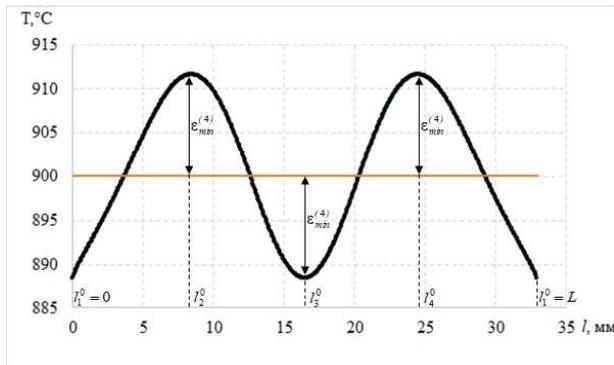
Найденные оптимальные значения всех неизвестных параметров для задачи оптимального проектирования показаны в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты решения задачи оптимального проектирования

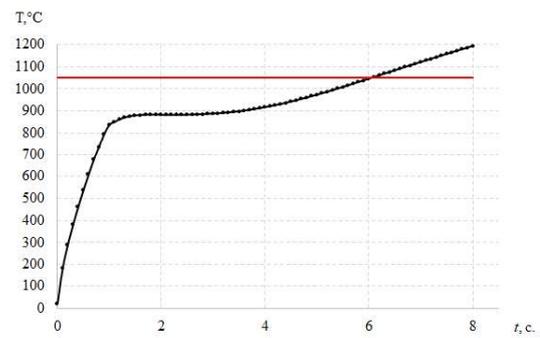
Параметр	p_1	p_2	p_3	I	$\varepsilon_{\min}^{(4)}$
Задача с полной информацией	11.9 мм	3 мм	4.4 мм	1382 А	11.5°C
Задача с интервальной неопределенностью при $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 15 \leq T_0 \leq 25$.	12.2 мм	3.6 мм	4.1 мм	1417 А	16.9°C
Задача с интервальной неопределенностью при $0.75 \leq \alpha_u \leq 0.95; 15 \leq T_0 \leq 25$.	11.8 мм	3.3 мм	4.6 мм	1391 А	13.4°C
Задача с интервальной неопределенностью при $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3; 10 \leq T_0 \leq 30$.	12.2 мм	3.7 мм	4.1 мм	1417 А	16.96°C

Температурное распределение на границе закаливаемого слоя $r = R - r^*$ в конце нагрева и изменение максимальной температуры заготовки в процессе нагрева в индукторе оптимальной конструкции для задачи с полной информацией показаны на рисунке 7.

Найденное решение задачи оптимального проектирования проанализировано путем сравнения с результатами, полученными с помощью генетических алгоритмов оптимизации AGDEMO и M-NSGA, а также с результатами нагрева в индукторе типовой конструкции (рис. 8).



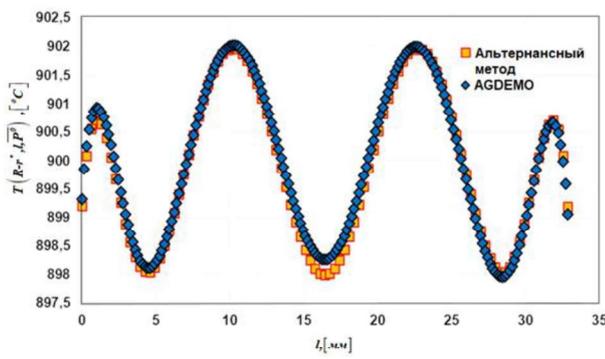
а)



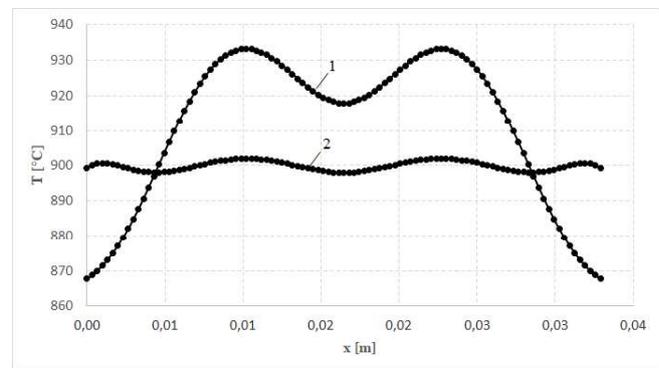
б)

а – температурное распределение на границе закаливаемого слоя; б – изменение во времени максимальной температуры

Рисунок 7 – Результаты решения задачи оптимального проектирования с полной информацией об объекте



а)



б)

а – сравнение с методом AGDEMO; б – сравнение с нагревом в индукторе типовой конструкции

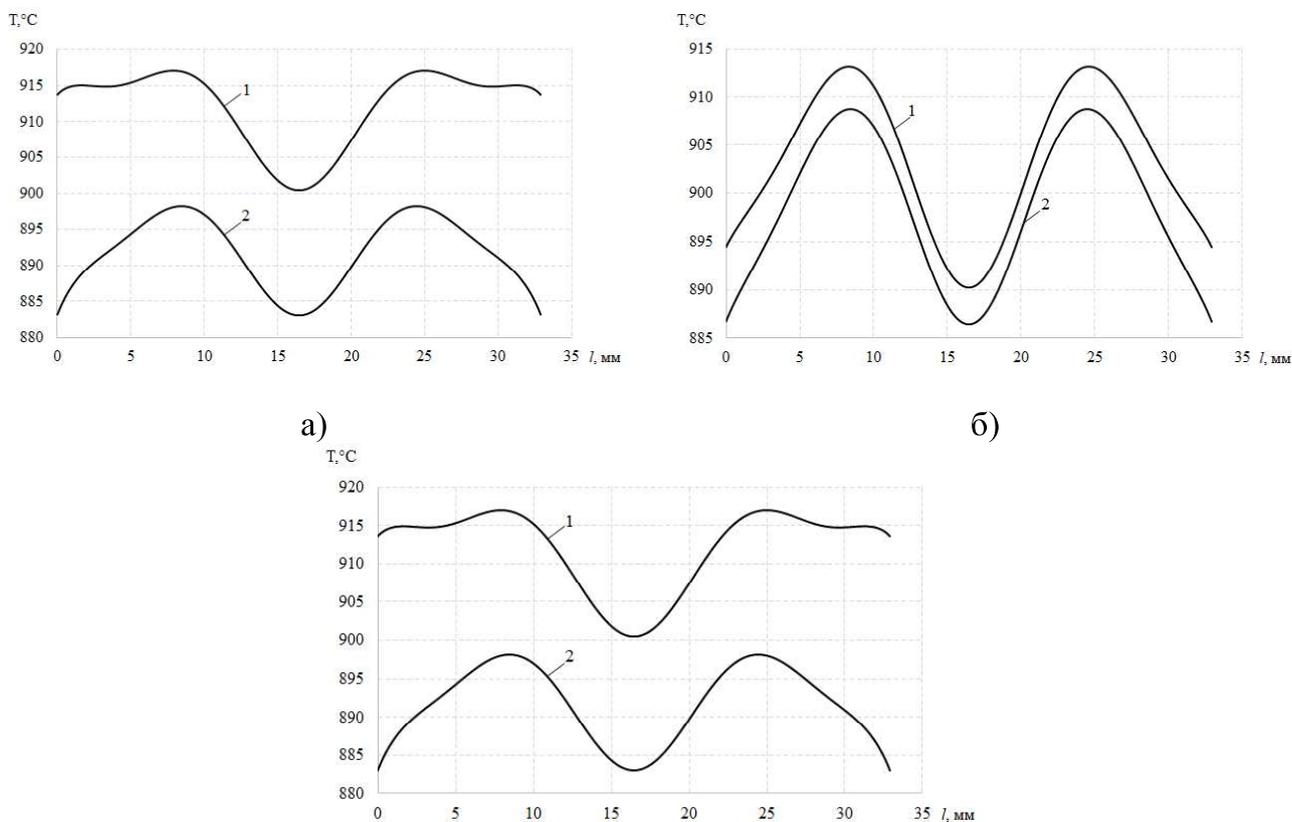
Рисунок 8 – Анализ результатов решения задачи оптимального проектирования

На основе представленного сравнения сделан 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 , что удовлетворяет самым жёстким технологическим требованиям, предъявляемым к процессам поверхностной закалки.

В конце стадии нагрева на поверхности изделия наблюдается существенный перегрев выше температуры 1050°C (рис. 7б), недопустимый для технологии поверхностной закалки, что обуславливает необходимость введения ограничения на максимальную температуру заготовки и решения задачи оптимального по быстрдействию управления с соответствующим фазовым ограничением.

Поскольку основной вклад в общие тепловые потери при скоростном нагреве выше точки Кюри, характерном для первой стадии поверхностной закалки, вносит теплообмен излучением, в задаче с не полностью определенными параметрами интервальная неопределенность вида (10) учитывается при определении коэффициента лучистого теплообмена.

Представлены и проанализированы результаты решения задачи с интервальной неопределенностью, полученные с помощью автоматизированной процедуры оптимизации (таблица 2). Результирующие температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя показаны на рисунке 9.



а)

б)

в)

а – при $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3$; $15 \leq T_0 \leq 25$; б – при $0.75 \leq \alpha_u \leq 0.95$; $15 \leq T_0 \leq 25$;

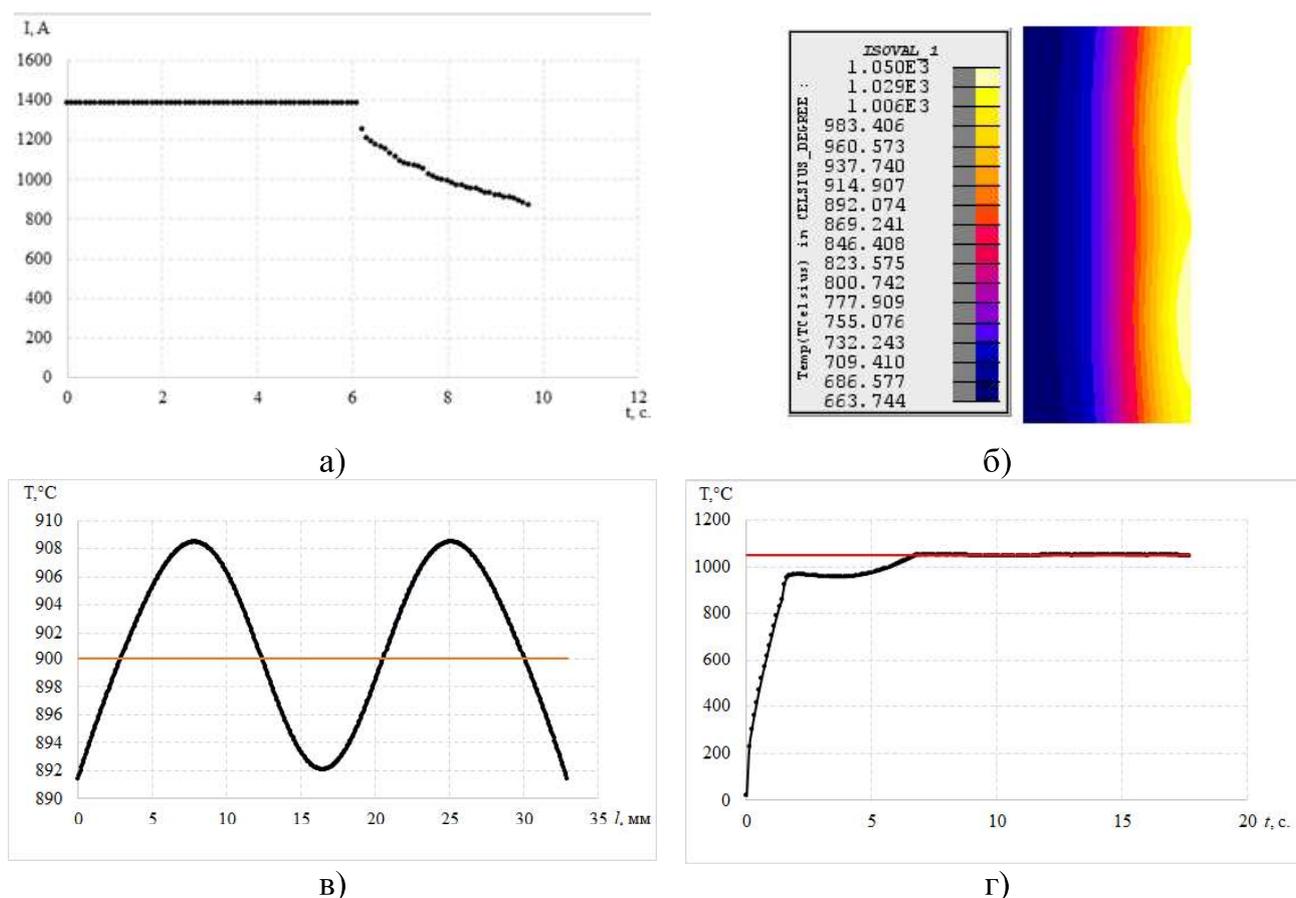
в – при $0.5 \leq \alpha_u \leq 1.3$; $10 \leq T_0 \leq 30$

Рисунок 9 – Результирующие температурные распределения вдоль границы закаливаемого слоя в задаче с интервальной неопределенностью (1 – для реализации $\bar{\beta}_{\max} = (T_{0\max}; \alpha_{\min})$, 2 – для реализации $\bar{\beta}_{\min} = (T_{0\min}; \alpha_{\max})$)

Анализ приведенных численных результатов показывает, что решение на основе разработанной методики сформулированной задачи оптимального проектирования в условиях отсутствия полного объема информации 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.

Приведены и проанализированы результаты решения задачи оптимального по быстродействию управления с учетом фазового ограничения на максимальную температуру заготовки. Значения конструктивных параметров нагревателя приняты равными оптимальным значениям, полученным в результате решения задачи оптимального проектирования. Управляющее воздействие, полученное с помощью представленного в главе 2 алгоритма, и результирующее температурное

распределение по центральному продольному сечению детали показаны на рисунке 10.



а – алгоритм оптимального управления; б – результирующее температурное распределение по центральному продольному сечению заготовки; в – результирующее температурное распределение вдоль границы закаливаемого слоя; г – история изменения максимальной температуры заготовки в процессе нагрева

Рисунок 10 – Результаты решения задачи оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру заготовки

Анализ результирующего температурного распределения вдоль границы закаливаемого слоя (рис. 10в) и изменения во времени максимальной температуры изделия (рис. 10г) 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.

Предложен вариант технической реализации найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления в задаче с ограничением на максимальную температуру заготовки.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Рассмотрена технология поверхностной индукционной закалки и установлено, что основной целью стадии нагрева является получение максимально равномерного температурного поля в закаливаемом слое изделия, получение которого невозможно при использовании типовых нагревателей и режимов их функционирования. В связи с этим в общем виде формулируется актуальная задача оптимизации индукционного нагревателя, как ОРП. 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 её точной редукции к задаче математического программирования, чем обусловлено использование этого метода для разработки предлагаемых в работе методик и алгоритмов.

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

3. Предложена новая методика решения сформулированных задач оптимального проектирования нагревателя с полной информацией об объекте и с интервальной неопределенностью основных параметров, обеспечивающая максимально достижимую точность нагрева поверхностного слоя детали, согласно которой решение рассматриваемых задач оптимизации конструкции индуктора можно свести к решению систем уравнений, замкнутых относительно всех искомых неизвестных параметров исследуемого процесса.

4. Разработан алгоритм решения нелинейной двумерной задачи оптимального по быстродействию управления с ограничением на максимальную температуру детали, согласно которому оптимальная программа управления 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 которой проведена её валидация на основе сравнения с результатами 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 решения сформулированных задач оптимального проектирования индуктора с полной информацией и с интервальной

неопределенностью основных параметров, полученные с помощью автоматизированной процедуры оптимизации. Показано сравнение представленных результатов с решением, найденным при использовании генетических методов и 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. Предложен вариант технической реализации найденного алгоритма оптимального по быстродействию управления в задаче с фазовым ограничением на максимальную температуру заготовки.

Основные научные публикации по теме диссертационного исследования

Публикации в научных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:

1. Yu. Pleshivtseva, G. Rogachev, **А. Попов** MATLAB-FLUX Coupling for numerical modeling in education // SHS Web of Conferences 29, 02033 (2016).
2. Yu. Pleshivtseva, M. Forzan, E. Sieni, **А. Попов** 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.
3. **А. Попов** 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.
4. Yu. Pleshivtseva, M. Baldan, E. Rapoport, A. Nikanorov, B. Nacke, **А. Попов** 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.

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **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.
2. Плешивцева Ю.Э., Дервянов М.Ю., **Попов А.В.**, Попова М.А. Оптимальное проектирование индуктора для поверхностной закалки цилиндрических заготовок на основе численной двумерной модели // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика: Научный журнал. – Астрахань: ФГБОУ ВО «АГТУ», 2019, №1. – С.40-50.
3. **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.

Публикации в других изданиях:

1. **А.В. Попов** 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: СГТУ; Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), СПбПУ, СПИИРАН; Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2016. – С. 60-67.

2. 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.

3. Плешивцева Ю.Э., Дервянов М.Ю., **Попов А.В.**, Попова М.А. 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.

4. **А.В. Попов** 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.

5. Yu. Pleshivtseva, B. Nacke, M. Baldan, E. Rapoport, A.Nikanorov, **A. Popov** 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.

Формат 60x84 1/16. Уч. изд. л. Тираж 100 экз. Заказ №__.

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.

e-mail: polygraf@samgtu.ru.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.07 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол №5 от 22.10.2020 г.)