

На правах рукописи

Животягин Денис Александрович

Исследование и разработка алгоритмов управления переходными режимами индукционных установок методического действия для нагрева алюминиевых сплавов перед деформацией

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2020

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Данилушкин Александр Иванович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электроснабжение  
промышленных предприятий» ФГБОУ ВО  
«Самарский государственный технический  
университет»

Официальные оппоненты: **Кувалдин Александр Борисович**  
доктор технических наук профессор,  
профессор кафедры «Электроснабжение  
промышленных предприятий и  
электротехнологий»  
ФГБОУ ВО "Национальный  
исследовательский университет "МЭИ"  
**Хлюпин Павел Александрович**  
к.т.н. доцент кафедры «Электротехника и  
электрооборудование предприятий»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет  
им.ЮА.Гагарина», г. Саратов

Защита состоится «15» декабря 2020 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, д. 18, корпус №1, ауд. 4А.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; тел.: 8(846)3370937. E-mail: a-ezhova@yandex.ru. С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18)

Автореферат разослан

2020 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.217.04  
кандидат технических наук, доцент



Е.В. Стрижакова

## Общая характеристика работы

Диссертация посвящена проблеме повышения энергоэффективности функционирования многосекционных индукционных нагревателей заготовок из алюминиевых сплавов в переходных и установившихся режимах нагрева.

### Актуальность проблемы

Высокие темпы развития электротермии и внедрения ее во многие отрасли производства определяются теми возможностями, которые дает использование электронагрева при решении задач, связанных с повышением качества материалов и изделий промышленного и бытового назначения; с дальнейшим ростом производительности труда; с экономией материальных и энергетических ресурсов; с решением проблемы защиты окружающей среды. В этих условиях большое значение имеют задачи совершенствования установок и систем управления индукционным нагревом металла. В современных условиях большое значение приобретают проблемы энергоэффективности технологических комплексов «индукционный нагрев – деформирующее оборудование» и гибкости технологического процесса, позволяющего оперативно переходить на другой тип заготовок. Поставленная задача может быть успешно решена при поиске конструктивных и режимных параметров индукционного нагревателя, обеспечивающих эффективное функционирование в установившемся и переходном режимах при нагреве заготовок широкой номенклатуры в одном нагревательном комплексе. Установки для нагрева под пластическую обработку имеют ряд особенностей. Режим работы нагревательной установки должен быть строго согласован с режимом работы деформирующего оборудования. Точность и повторяемость конечного температурного состояния заготовки перед прессованием в значительной степени определяет качество готового изделия.

В процессе эксплуатации технологической линии «методический индукционный нагреватель – деформирующее оборудование» возникает необходимость первоначального запуска нагревателя в работу или смены типогабарита заготовок для прессования. Опыт работы машиностроительных производств показывает, что в течение рабочей смены происходит от трех до пяти плановых остановок оборудования различной длительности. Простой деформирующего оборудования приводят к снижению экономических показателей работы. Важным вопросом при решении задачи эффективного управления является уточнение математических моделей электромагнитных и тепловых процессов в переходных режимах многосекционного методического нагревателя. При методическом нагреве заготовок под пластическую деформацию задача моделирования процесса нагрева в переходных режимах усложняется существенно нелинейной зависимостью распределения удельной мощности нагрева по длине нагревателя от температурного распределения. Особенно заметно это влияние сказывается в условиях частой смены номенклатуры заготовок, отличающихся по длине и диаметру. В установившихся и переходных режимах работы нагревателей методического действия происходит изменение температурного распределения в металле по длине нагревателя, а, следовательно, и электрических параметров системы «индуктор-металл». В связи с этим создание инженерной методики расчета параметров процесса нагрева и разработка алгоритмов управления, обеспечивающих при заданных характеристиках нагрева повышение технико-экономических и

эксплуатационных показателей индукционных нагревательных комплексов, имеет важное значение и является актуальным.

**Объектом исследования** является многосекционная индукционная нагревательная установка методического действия для нагрева массивных цилиндрических заготовок из сплавов алюминия перед обработкой на деформирующем оборудовании.

**Целью работы** является повышение энергоэффективности функционирования многосекционных индукционных установок для нагрева заготовок из алюминиевых сплавов в переходных и установившихся режимах нагрева. Решение поставленных задач составляет основное содержание диссертационной работы, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете.

Работа выполнялась в рамках фундаментальной НИР при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00212 А по заданию Министерства образования РФ.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

- Разработка уточненных численных математических моделей процесса индукционного нагрева заготовок из сплавов алюминия, ориентированных на решение задач исследования установившихся и переходных режимов многосекционного индукционного нагревателя методического действия;
- Исследование электромагнитных и тепловых полей в системе «индуктор–загрузка» в переходных режимах с учетом изменяющихся в процессе выхода на установившийся режим нагрева электрических параметров системы;
- Разработка и исследование алгоритмов управления переходными режимами работы в условиях существенного изменения электрических параметров нагревателя в процессе выхода на установившийся режим и обусловленной этим необходимостью учета предельных возможностей источника питания;
- Разработка рекомендаций по выбору алгоритмов управления переходными и стационарными режимами, обеспечивающих снижение непроизводительных затрат электроэнергии на нагрев «ложных» заготовок;
- Разработка и техническая реализация системы автоматического управления режимами работы многосекционного методического индукционного нагревателя.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования и анализа, теории тепловых и электромагнитных процессов, численные методы решения электромагнитных и тепловых задач, методы проектирования и компьютерного моделирования.

Достоверность результатов работы оценивалась путем анализа результатов численных экспериментов и сравнения их с данными, полученными в работах других авторов.

#### **Научная новизна**

- Предложена численная математическая модель нестационарного процесса методического индукционного нагрева дискретно перемещающихся крупногабаритных заготовок из сплавов алюминия в переходных и установившихся режимах работы, отличающаяся учетом электромагнитных и тепловых краевых

эффектов и ориентированная на решение задачи совершенствования алгоритмов управления режимами функционирования многосекционного индукционного нагревателя методического действия;

– разработана методика расчета температурного распределения в загрузке многосекционного методического индукционного нагревателя, отличающаяся учетом наличия двух независимых источников тепла в одной заготовке;

– разработана методика поиска параметров управления многосекционным нагревателем в переходных и установившихся режимах, отличающаяся учетом зависимости распределения удельной мощности нагрева по секциям нагревателя от распределения температуры по длине загрузки в условиях смены номенклатуры заготовок;

– разработаны и исследованы алгоритмы управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия, обеспечивающие программное управление максимальной мощностью секций и одновременное функционирование замкнутой системы регулирования в условиях ограниченной наблюдаемости.

### **Практическая полезность работы**

Практическая польза проведенных исследований определяется следующими результатами:

– Разработан и реализован на ЭВМ алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей в переходных и установившихся режимах индукционной нагревательной установки методического действия с учетом изменяющихся в процессе нагрева электрических параметров системы;

– Предложены алгоритмы управления процессом нагрева заготовок в многосекционном индукционном методическом нагревателе в переходных и установившихся режимах работы, обеспечивающие снижение непроизводительного расхода энергии;

– разработана структура автоматической системы, реализующей функционирование многосекционного индукционного нагревателя в переходных и установившихся режимах с заданными показателями в условиях ограниченной наблюдаемости.

### **Реализация результатов работы**

Результаты работы использованы в научно–исследовательской работе в виде алгоритмического и программного обеспечения при исследовании электромагнитных и тепловых полей в системах индукционного нагрева, на предприятии «Самарский металлургический завод» для расчета системы управления многосекционной индукционной установкой методического действия для нагрева заготовок перед прессованием, в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

### **Апробация работы**

Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: IV международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике» 19 декабря 2017г, г. Барнаул; на 24 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА. Тез. докл. – М.: МЭИ, 15–16 марта 2018. Москва;. На 4-ой

Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении». (18-19 февраля 2019г.). Юго-Зап. гос. ун-т, г. Курск.; на VIII МНПК «Актуальные проблемы энергетики АПК», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2017г., (Саратов).

### **Публикации**

По результатам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, 3 из которых в изданиях из списка ВАК, 2 индексированы в базе Scopus.

**Личный вклад автора.** В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: в работе [1,2] – разработка математической модели процесса и адаптация к алгоритму оптимизации; [3] – анализ тепловых процессов линии термообработки; [4] – анализ эффективности использования бесконтактных систем измерения температуры в линиях термообработки; [5] – постановка задачи моделирования тепловых процессов в режиме пуска; [6] – определение числа и места расположения датчиков температуры в потоке жидкости; [7] – подготовка компьютерной модели и проведение расчетов тепловых процессов; [8,9] – разработка алгоритма управления.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

– Методика численного расчета параметров управления переходными и установившимися режимами функционирования многосекционного индукционного нагревателя методического действия с немагнитной нагрузкой, позволяющая, в отличие от известных, учитывать влияние на температурное распределение наличия двух независимых источников тепла в заготовках, находящихся в двух смежных секциях;

– Методика поиска параметров управления многосекционным нагревателем в переходных и установившихся режимах, отличающаяся учетом зависимости распределения удельной мощности нагрева по секциям нагревателя от распределения температуры по длине загрузки в условиях смены номенклатуры заготовок;

– Алгоритмы эффективного управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия в условиях нелинейной зависимости электрических параметров нагревателя, теплофизических характеристик заготовок и теплового потока излучением между поверхностями заготовок и футеровки от распределения температуры по длине, позволяющие, в отличие от известных, исключить использование «ложных» заготовок в условиях смены типогабарита заготовок;

– Система автоматического управления многосекционным нагревателем, реализующая эффективное функционирование многосекционного индукционного нагревателя в переходных и установившихся режимах с заданными показателями в условиях ограниченной наблюдаемости.

– Рекомендации по выбору эффективных алгоритмов управления переходными и установившимися режимами, исключающих непроизводительные затраты на нагрев «ложных» заготовок и сокращение времени простоя деформирующего оборудования.

**Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук** выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.09.10 – «Электротехнология» и соответствует формуле специальности: «В рамках специальности решаются проблемы использования электроэнергии в

термических процессах различного назначения... рассматриваются проблемы оптимального проектирования электротехнологических комплексов и эффективного управления их оборудованием».

**Объектом изучения** являются «электротехнологические комплексы и системы, которые рассматриваются как самостоятельные объекты исследования и должны соответствовать по эффективности, безопасности и экономичности требованиям к техническим объектам, функциональными особенностями которых является использование электротехнологических процессов».

**Область исследования** соответствует пунктам: 3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнологических комплексов и систем, их оптимизация, разработка алгоритмов эффективного управления.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 165 страницах машинописного текста; содержит 148 рисунков и 45 таблиц, список использованных источников, включающий 89 наименований, два приложения.

**Краткое содержание работы.** В работе изложены научно обоснованные технические и технологические разработки, обеспечивающие решение одной из важных задач машиностроительной промышленности.

**В первом разделе** рассматривается проблема управления индукционными нагревателями с дискретным перемещением заготовок, проведен обзор современного состояния методов расчета электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве металла и управления режимами нагрева.

Особенностью исследуемой индукционной нагревательной установки является наличие нескольких секций с автономными источниками питания (рис.1). В установке осуществляется нагрев заготовок широкой номенклатуры – сплошных и полых различного диаметра и длины. Полная загрузка индукционного нагревателя может включать от шести до восьми заготовок. Для таких заготовок температуры торцевых поверхностей смежных заготовок могут значительно отличаться. При этом возникает дополнительная неравномерность температуры по длине заготовки. Основная сложность возникает в разработке адекватных математических моделей и алгоритмов поиска управления, обеспечивающих эффективность функционирования установки при протекании в ней нескольких взаимосвязанных процессов.

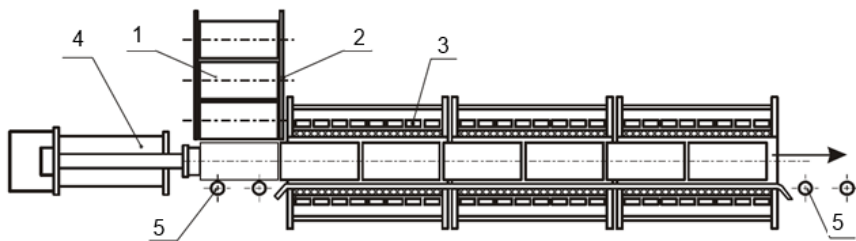


Рис.1 Общий вид индукционного нагревателя: 1 – заготовки; 2 – бункер; 3 – индуктор; 4 – толкатель; 5 – ролики транспортера.

Вопросам аналитического и численного моделирования при индукционном нагреве для задач проектирования и управления посвящены работы А.Е. Слухоцкого,

А.Б. Кувалдина, Л.С. Зимина, В.С. Немкова, В.Б. Демидовича, В.И. Руднева и др.. Проблемам оптимального управления процессами индукционного нагрева по различным критериям качества посвящены работы Рапопорта Э.Я., Лившица М.Ю., Плешивцевой Ю.Я., Данилушкина А.И., Базарова А.А. и др. Выполненный автором анализ показывает, что в большинстве рассматриваемых работ решались частные задачи поиска оптимального управления стационарными и переходными режимами работы нагревателей, не охватывающие всего круга проблем. К таким неисследованным проблемам относятся вопросы управления переходными режимами многосекционных индукционных нагревателей методического действия для нагрева крупногабаритных заготовок из сплавов цветных металлов перед обработкой на деформирующем оборудовании.

**Второй раздел** посвящен разработке численных математических моделей тепловых и электромагнитных процессов в системе «индукционный нагреватель – загрузка», адаптации моделей с учетом дискретного характера движения и исследования многоканальных систем регулирования температуры.

Индукционная многосекционная установка для нагрева алюминиевых сплавов состоит из трех сдвоенных индукторов, расположенных вплотную друг к другу. Моделирование тепловых процессов при индукционном нагреве заготовок в индукторе методического действия осуществляется на основе дифференциального уравнения в частных производных

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k \nabla T) - \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = Q \quad (1)$$

Здесь:  $\rho$  - плотность материала;  $k$  - коэффициент теплопроводности;  $C_p$  - удельная теплоемкость;  $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$  - оператор набла;  $\mathbf{u}$  - вектор скорости;  $Q$  - объемная плотность мощности тепловыделения в загрузке.

Постановка задачи дополняется граничными условиями. Теплообмен между внешними торцевыми поверхностями первой и последней заготовок и окружающей средой в индукционном многосекционном нагревателе осуществляется с помощью процессов излучения и конвекции

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_c - T) + \varepsilon \sigma_0 (T_c^4 - T^4) \quad (2)$$

Здесь:  $n$  - нормаль по отношению к поверхности теплообмена;  $h$  - коэффициент конвективного теплообмена с окружающим воздухом;  $\varepsilon$  - коэффициент излучения материала (степень черноты);  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{ К}^4)$  - постоянная Стефана - Больцмана.

При теплообмене излучением между боковыми поверхностями заготовок и футеровки секций индуктора выражение (2) преобразуется и содержит температуры поверхностей заготовки и футеровки

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma_0 (T_s^4 - T_\phi^4) \quad (3)$$

Перенос тепла между соседними заготовками в индукторе зависит от термического сопротивления контактного слоя. Для упрощения расчета сложный



теплообмен между торцевыми поверхностями соседних заготовок заменен на передачу тепла через твердое тело. Коэффициент теплопроводности принимается с учетом оценочных значений перепада температуры в месте контакта.

Уравнение (1) содержит вектор скорости движения нагреваемого тела. Предложена расчетная схема на базе алгоритма изменения вектора скорости с помощью ступенчатой функции, позволяющей через определенные промежутки времени изменять значения в требуемом диапазоне

$$v = v_1 + v_2 \cdot (H(t-t_1) - H(t-t_2)) + \dots + H(t-t_m) - H(t-t_n) \quad (4)$$

Ступенчатая функция в выражении (4) используется для описания изменения мощности, связанного с перемещением через индуктор, а также при моделировании процесса регулирования температуры с помощью системы автоматического регулирования. Необходимым условием такого решения является возможность программного обеспечения назначать контрольные точки для измерения интересующей переменной  $u_j$  (в данном случае, температуры).

Электромагнитная задача для системы с движущимися телами формулируется в виде уравнений Максвелла, описывающих связь между основными электромагнитными величинами, такими как напряженность магнитного поля и индукция.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}^e; \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho; \nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (6)$$

Здесь:  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{E}$  – векторы напряженности магнитного и электрического поля;  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{D}$  – векторы индукции магнитного и электрического поля;  $\mathbf{J}^e$  – вектор плотности внешнего тока;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости движущегося проводника;  $\sigma$  – электропроводность материала;  $\rho$  – плотность электрического заряда.

Для перехода к численному решению исходная система формулируется в терминах векторного магнитного потенциала к виду:

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0) \mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) - \sigma \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \left( \frac{\sigma V_{\text{вит}}}{2\pi r} + \mathbf{J}_\varphi^e \right); \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = A_\varphi e^\varphi. \quad (8)$$

Здесь:  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость среды;  $V_{\text{вит}}$  – потенциал витка;  $J_\varphi^e$  – плотность стороннего тока;  $\varphi$  – сдвиг по фазе вектора тока относительно напряжения.

В качестве граничных условий принимается равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области

$$A_\varphi = A_{0\varphi}. \quad (9)$$

На линии осевой симметрии граничное условие задается в виде равенства нулю производной функции магнитного потенциала. На базе основного дифференциального уравнения и граничных условий осуществляется конечно-элементная формулировка и строится система алгебраических уравнений.

Рассмотренные выше модели тепловой (1) и электромагнитной (7) задач, дополненные граничными условиями, объединяются в систему. Связь между процессами обеспечивается через электропроводность в уравнении (10), зависящую от температуры, и через источники тепла в уравнении (11). После преобразований исходные уравнения (1), (7) приводятся к конечному компактному виду систем алгебраических уравнений

$$\begin{cases} [\hat{K}_I] \{I\} = \{Q_I\}; \\ [\hat{K}_T] \{T\} = \{Q_T\}. \end{cases} \quad (10)$$

Система алгебраических уравнений (10) для нестационарной нелинейной задачи требует многократного решения на каждом шаге по времени.

Для моделирования программного управления электротепловыми процессами в системе «многосекционный индуктор – нагрузка» предложена модификация расчетной модели, использующей переменное значение управляющего воздействия с помощью задания настроек параметров интервалов управления. В общем случае управляющее воздействие для  $i$ -й секции должно иметь вид

$$u_i(t) = a_i \cdot f_1(t) \cdot (1 - H(t - t_1)) + b_i \cdot f_2(t) \cdot H(t - t_1). \quad (11)$$

Здесь:  $a_i, b_i$  – масштабирующие коэффициенты, соответствующие уровням мощности до и после переходного процесса;  $f_1(t), f_2(t)$  – функции, описывающие плавное изменение управляющего воздействия во время переходного процесса;  $H(t - t_1)$  – ступенчатая функция (функция Хевисайда), описывающая скачкообразный переход от одного значения к другому (от 0 к 1);  $t_1$  – момент времени, когда происходит переключение функции управления.

Для моделирования замкнутой системы управления тепловыми процессами предложен более сложный вариант, позволяющий использовать несколько каналов управления. Предусматривается выбор контрольных точек на геометрической модели заготовок, расчет управляющих воздействий для каждого канала управления (каждой секции) и изменение величины мощности тепловыделения в каждой заготовке с учетом таких особенностей, как краевые эффекты.

$$u_i(t_n) = k(T_{zi,n} - T_{i,n}). \quad (12)$$

Здесь:  $T_{zi,n}$  – температура задания для  $i$ -го канала управления для момента времени  $t_n$ ;  $T_{i,n}$  – расчетное значение температуры в  $i$ -й точке контроля для момента времени  $t_n$ ;  $k$  – коэффициент регулятора температуры.

**В третьем разделе** решаются задачи определения параметров индукционной системы при программном управлении нагревом, расчета электрических параметров секций индуктора, моделирования процессов с разными способами управления индуктором.

В данном разделе исследуются возможности системы программного управления в процессе выхода на установившийся режим, необходимость использования ложных слитков и влияния темпа выдачи заготовок на предельные отклонения температуры от заданного уровня. Программное управление индукционным нагревом строится на базе связанных электротепловых моделей.

Настройка частоты при нагреве должна производиться при равенстве емкостного и индуктивного токов, которые зависят от частоты. Исходное значение емкости определяется из условия настройки контура на резонанс токов при

начальной температуре заготовок  $T=20$  градусов и частоте  $f=50$  Гц. Для параллельной схемы замещения с компенсирующей емкостью должно выполняться соотношение

$$x_C = x_L. \quad (13)$$

При изменении индуктивного сопротивления необходимо скорректировать реактивное сопротивление емкости за счет изменения частоты. Вычисление реактивного сопротивления емкости производится по выражению

$$x'_C = x'_L = \frac{1}{2\pi f' C}. \quad (14)$$

Такие расчеты проведены для всех секций индуктора. Расчеты показали, что вариация параметров системы «индуктор-заготовка» приводит к возрастанию тока, потребляемого контуром, на 36% по отношению к активной составляющей.

Моделирование тепловых процессов в многосекционном индукторе предполагает на каждом этапе перемещения заготовок загрузку холодной и выгрузку горячей. Использование нелинейных моделей позволяет автоматически пересчитывать все параметры для каждой заготовки в электромагнитной и тепловой моделях. Для сравнения проведено моделирование с разными интервалами нагрева сплошных заготовок диаметром 1075 мм. Главной задачей было выявление отклонений температуры при заданном значении температуры. Для каждого значения интервала параметры подбирались путем последовательного изменения значений мощности с последующим расчетом и коррекцией. Проведены расчеты при двух разных способах задания мощности в секциях: 1 – одинаковые токи во всех секциях; 2 – токи в секциях подбираются.

Проведено моделирование при задании одинакового тока в секциях с различными интервалами нагрева, которое имеет цель определения достижимой погрешности температурного распределения. Расчеты позволили экспериментальным путем подобрать значения токов в секциях индуктора, при которых диаграммы температуры в заготовках имеют близкие к требуемым значения.

Для достижения требуемого распределения температуры в заготовках проведены аналогичные расчеты при уменьшении тока в секциях индуктора при одновременном увеличении интервалов времени на нагрев (рис.2,3). Анализ результатов расчета параметров системы индукционного нагрева дискретно перемещаемых заготовок при питании всех секций одинаковым током показал, что для получения допустимых отклонений температуры от заданного значения требуется увеличение времени интервалов нагрева с 1200с до 1800 – 2000 с.

Полученные параметры индукционных нагревателей иллюстрируют медленное снижение перепада температуры по толщине заготовок при значительном увеличении времени нагрева. При ограничении на максимальное значение температуры уменьшение времени нагрева можно достичь увеличением мощности в первых секциях с последующим выравниванием температуры в последующих секциях. При величине интервала нагрева, равном 900 с, на основании нескольких экспериментов определены такие значения мощности для каждой секции, при которых температура во всех заготовках в любой момент времени не превышала предельно допустимых значений. Дальнейшее увеличение времени нагрева заготовок на каждом интервале до 1000 секунд проиллюстрировано на рисунках 4,5.

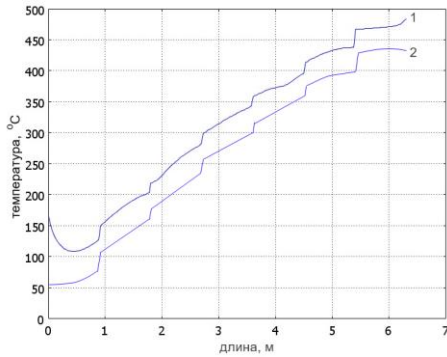


Рис.2 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве с интервалом нагрева 1800 с в момент времени 12600 с.

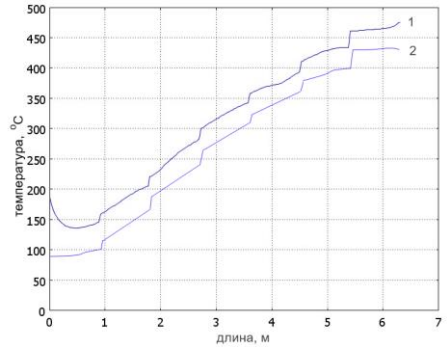


Рис.3 Диаграммы температуры на поверхности (1) и осевой линии (2) при нагреве с интервалом нагрева 2000 с в момент времени 14000 с.

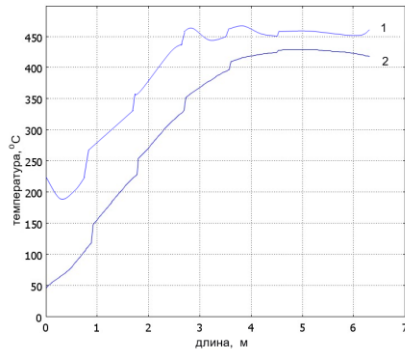


Рис.4 Диаграммы температуры на поверхности (1) и оси (2) загрузки в момент времени 7000 с

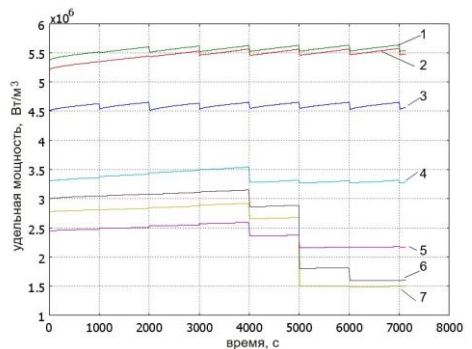


Рис.5 Временные диаграммы удельной мощности в заготовках: 1 – первая; 2 – вторая; 3 – третья; 4 – четвертая; 5 – пятая; 6 – шестая; 7 – седьмая

Диаграммы температуры на поверхности и осевой линии (рис.5) в момент времени 7000 с, показанные на рис.4, показывают, что перепад температуры между поверхностью и осевой линией снизился до заданного значения (30 град.). На временных диаграммах удельной мощности, показанных на рис.5, видно, что в момент времени  $t=4000$  с, начинается ступенчатое снижение в последних секциях. В целом, более сложный алгоритм задания токов секций позволяет не только быстрее выйти на заданный уровень температуры, но и показывает возможности программного управления в различных переходных режимах, как, например, при смене типа заготовок.

В результате исследования вариантов программного управления мощностью секций индукционного нагревателя путем подбора токов во всех секциях сделан

вывод, что возможности системы с разными токами секций выше, чем при одинаковом токе, и достаточно интервала времени 1000 с для обеспечения заданного отклонения температуры; снижение мощности последней секции имеет ограничения, обусловленные недостаточной компенсацией потерь на торце.

**В четвертом разделе выполнено** моделирование тепловых процессов в загрузке при применении системы автоматического регулирования с дискретно перемещаемыми заготовками при разном числе каналов регулирования.

Система регулирования температуры в многосекционном индукторе представлена на рис.6. Контроль температуры на выходе секций осуществляется с помощью датчиков температуры ДТ1 – ДТ6. Для формирования управляющего воздействия используются простейшие пропорциональные регуляторы. Регулятор в моделирующей программе построен с помощью встроенных в Comsol ступенчатых функций  $(1 - flchls(u_k - T_k, \Delta t))$ .

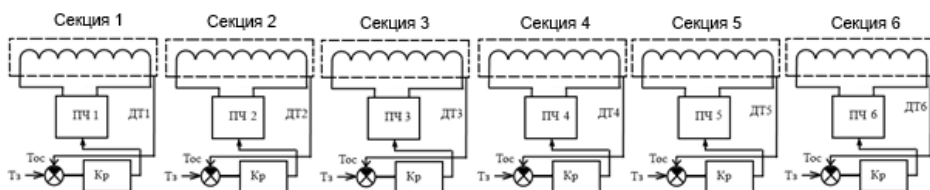


Рис.6 Функциональная схема шестисекционного индукционного нагревателя

**Для определения возможностей САР** в достижении заданного распределения температуры в заготовке, выгружаемой из индуктора на конвейер для транспортировки к прессу, проведен ряд расчетов при разных значениях интервала нагрева заготовок. После получения решения корректировались значения мощности каждой секции на основании полученных диаграмм температуры на поверхности и на осевой линии всех заготовок в индукторе. Проведены исследования для диапазона интервала нагрева от 800 до 1100 секунд.

Требуемые по технологии обработки результаты получены при длительности интервалов нагрева, равной 900 с (рис.7,8). Здесь учтено, что при меньших значениях времени, соответствующих большему значению мощности, наблюдаются временные локальные перегревы.

Как видно из таблицы, при времени интервала нагрева заготовок 900 с и более отклонения температуры на выходе из индуктора и непосредственно перед прессованием укладываются в требуемый диапазон. Средний уровень температуры изменяется незначительно и находится в пределах допустимых отклонений, улучшается равномерность распределения во всем объеме заготовки.

При интервале нагрева заготовок, равном 800 с, на выходе из индуктора перепад температур существенно превышает допустимые отклонения. Выравнивание температуры в процессе транспортировки в течение 120 секунд снижает перепад до 39 градусов, что близко к допустимым отклонениям.

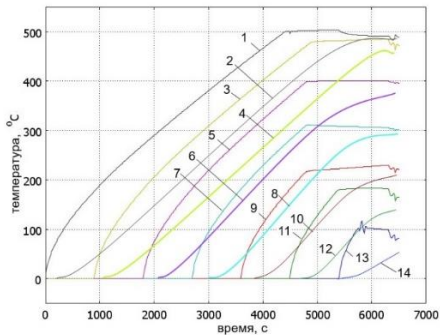


Рис.7. Временные диаграммы температуры в контрольных точках секций на поверхности заготовок: 1 – седьмая; 3- шестая; 5 – пятая; 7 – четвертая; 9 – третья; 11 – вторая; 13 – первая; на осевой линии: 2 – седьмая; 4- шестая; 6 – пятая; 8 – четвертая; 10 – третья; 12 – вторая; 14 – первая

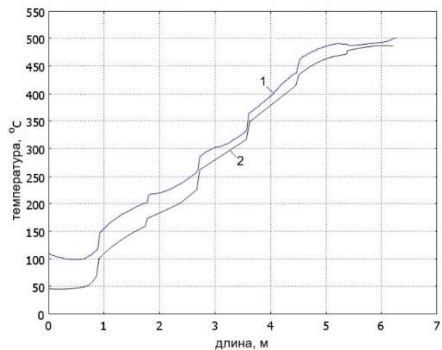


Рис.8. Диаграммы температуры в загрузке в момент времени 6300 с: 1 – на поверхности; 2 – на осевой линии.

Для оценки возможностей замкнутой системы регулирования выполнено исследование влияния количества контрольных точек на управляемость системы индукционного нагрева. Исходная система управления содержит шесть точек контроля температуры, расположенных на расстоянии 0,1 м от выхода из секций. Относительно заготовок местоположение датчиков отличается в зависимости от номера заготовки в индукторе. Использование системы автоматического регулирования имеет большие возможности, но требуется создание резерва мощности для отработки возникающих возмущений. Это приводит к возможности локального перегрева. Поэтому необходим контроль температуры по всей длине индуктора. Моделирование процессов нагрева с системой управления, содержащей шесть, три (в четвертой, пятой и шестой секциях) и два (в пятой и шестой секциях) канала регулирования показало, что шестиканальная система при правильно выбранном темпе выдачи эффективна при разных мощностях секций. Мощность тепловыделения автоматически ограничивается системой регулирования. При использовании трех каналов регулирования возникают режимы с перегревом, которые устраняются при искусственном ограничении мощности в первых трех секциях за счет подбора. Двухканальный режим практически не способен реализовать возможности замкнутой системы регулирования и равноценен режиму с программным управлением.

В работе выполнен расчет параметров системы программного управления индукционной системой при смене сплошных заготовок на пустотелые. Нагрев сплошных и пустотелых заготовок осуществляется с разным темпом выдачи, так как для выравнивания распределения температуры для сплошных заготовок требуется большее время, чем для пустотелых заготовок.

В работе показано, что для определенной номенклатуры смена типа заготовок в индукционном нагревателе без остановки процесса возможна без использования ложных слитков. В таком случае переход осуществляется в два этапа. Сначала производится корректировка темпа выдачи. После изменения времени нагрева на каждом шаге с пошаговой коррекцией мощности секций индуктора осуществляется пошаговая замена сплошных заготовок на пустотелые. При смене типа заготовок путем последовательного заполнения секций производится корректировка мощности секций индуктора. Рассмотрены вопросы выбора параметров управления при изменении интервала нагрева пустотелых заготовок диаметром 1075 мм. На первом этапе выполняется исследование тепловых процессов и определение достижимой величины отклонений температуры по длине и толщине слитка. При поиске удовлетворительного варианта настроек секций индукторов был произведен ряд расчетов, в ходе которых сначала было осуществлено моделирование первой стадии – выход на установившийся режим с интервалом нагрева 1000 с, а потом произведен переход на нагрев с интервалом 1200 с. Расчеты температуры в загрузке для разных вариантов проиллюстрированы с помощью диаграмм температуры на внешней и внутренней поверхностях пустотелой загрузки в моменты времени 7000 с, что соответствует окончанию нагрева с интервалом нагрева 1000 с, и времени 14200 с, что соответствует окончанию перехода на интервал нагрева 1200 с.

На рис.9,10 показано, что система регулирования температуры при нагреве пустотелых заготовок дает хорошие результаты: на выходе из индуктора температура внешней поверхности равна 440-455 градусов, а на внешней поверхности 425 градусов. Окончание перехода на темп выдачи 1200с характеризуется температурой внешней поверхности 435-450 градусов, в внутренней поверхности 400-410 градусов. Перепад температур довольно велик в пределах пустотелой заготовки в конце перехода на новый режим.

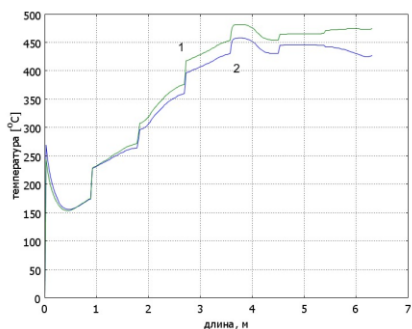


Рис.9 Диаграммы температуры по длине индуктора на внешней поверхности пустотелой заготовки при смене интервала с 1000 до 1200 с: 1 – при  $t = 7000$  с; 2 – при  $t = 14200$  с

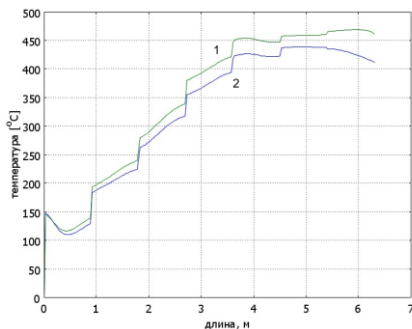


Рис.10 Диаграммы температуры по длине индуктора на внутренней поверхности пустотелой заготовки при смене интервала с 1000 до 1200 с: 1 – при  $t = 7000$  с; 2 – при  $t = 14200$  с.

В работе выполнен расчет параметров управления с системой автоматического регулирования при смене типогабарита заготовок. Исследовано поведение системы

при переходе от сплошных заготовок к пустотелым, и наоборот, от пустотелых к сплошным. Заготовки имеют длину 900 мм, внешний диаметр 1075 мм. Пустотелые заготовки имеют такие же габариты с внутренним диаметром 600 мм. Исследования проведены при разных значениях интервала нагрева заготовок: 900, 1000 и 1100 с.

Результаты моделирования при интервале нагрева 900 с при переходе от пустотелых заготовок к сплошным показали, что распределение температуры укладывается в заданные отклонения только в установившемся режиме. Первые сплошные заготовки, вышедшие из индуктора, имеют отклонения больше, чем допустимо. Ко времени окончания каждого интервала температура на осевой линии в конце и начале седьмой заготовки достигает значения 420 и 390 градусов. Для последующих заготовок в моменты времени 13500 секунд и 14400 секунд температура возрастает до требуемого значения. В то же время на внешней поверхности для пустотелой и сплошной заготовок на выходе из индуктора все отклонения находятся в допустимых пределах. Моделирование тепловых процессов при смене типа заготовок с интервалом нагрева 1000с показало хорошие результаты при обоих направлениях перехода.

Исследование процессов смены типа заготовок с пустотелых на сплошные и со сплошных на пустотелые для удобства сопоставления результатов расчета представлено в виде однотипных диаграмм: в каждой паре рисунков слева представлена иллюстрация перехода с пустотелых на сплошные заготовки, а справа – со сплошных на пустотелые. При рассмотрении диаграмм распределения температуры по длине загрузки в отдельные моменты времени можно отметить, что на осевой линии (рис.11,12) наблюдается лишь небольшой перепад по длине в последней заготовке при переходе со сплошных заготовок.

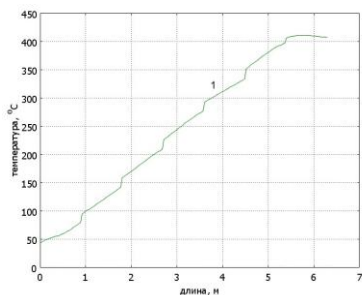


Рис.11 Диаграммы температуры по длине загрузки при  $r=0$  м при  $t=14000$  с (сплошные заготовки)

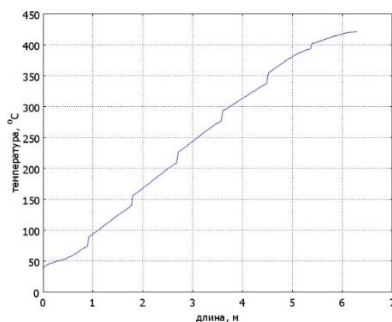


Рис.12 Диаграмма температуры по длине загрузки при  $r=0$  при  $t=7000$  с. (сплошные заготовки)

На продольной линии загрузки с радиусом 0,3 м (рис.13, 14) температура пустотелых заготовок больше подвержена проявлению колебательных процессов в системе регулирования. Особенно ярко это проявляется на диаграмме 1 рис.14. Аналогичная картина с колебаниями температуры наблюдается на поверхности заготовок (рис.15, 16). Колебания температуры при переходе на пустотелые заготовки становятся гораздо значительнее, что объясняется меньшей тепловой инерционностью и большим запасом по мощности тепловыделения.



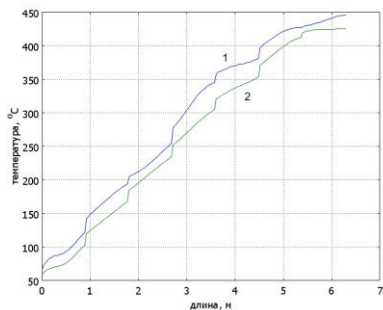


Рис.13 Диаграммы температуры по длине загрузки при  $r=0,3$  м: 1 – при  $t=7000$  с (пустотелые заготовки); 2 – при  $t=14000$  с (сплошные заготовки).

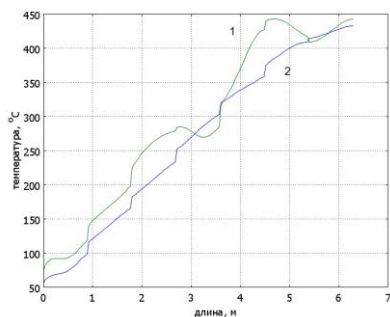


Рис.14 Диаграммы температуры по длине загрузки при  $r=0,3$  м: 1 – при  $t=14000$  с (пустотелые заготовки); 2 – при  $t=7000$  с (сплошные заготовки).

Переход с одного типа заготовок на другой (смена сплошных пустотелыми) осуществляется в два этапа. На первом этапе поочередно загружается новая заготовка и производится коррекция мощности первой секции индуктора. Затем при загрузке последующих заготовок корректируются мощности очередных индукторов. На втором этапе производится ступенчатое изменение мощности и интервала времени нагрева (темпа выдачи) для обеспечения более производительной работы нагревателя. Переход с пустотелых заготовок на сплошные производится в обратной последовательности: сначала увеличивается время нагрева и лишь затем происходит пошаговая замена заготовок с коррекцией мощности индукторов.

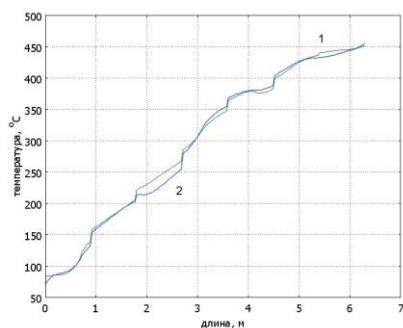


Рис.15 Диаграммы температуры по длине загрузки при  $r=0,53$  м: 1 – при  $t=14000$  с (сплошные заготовки); 2 – при  $t=7000$  с (пустотелые заготовки).

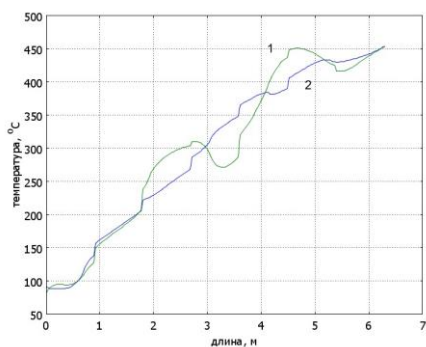


Рис.16 Диаграммы температуры по длине загрузки при  $r=0,54$  м: 1 – при  $t=14000$  с (пустотелые заготовки); 2 – при  $t=7000$  с (сплошные заготовки).

Реализация системы индукционного нагрева выполнена на базе транзисторных преобразователей частоты. Преобразователь частоты имеет возможность изменения

частоты напряжения для подстройки колебательного контура «индуктор – конденсатор», чтобы коэффициент мощности всегда был близким к единице без переключения банок конденсаторной батареи.

Управление процессом индукционного нагрева реализовано различными способами с применением разных аппаратных средств. Существующая система построена на основе шести преобразователей частоты (рис.17).

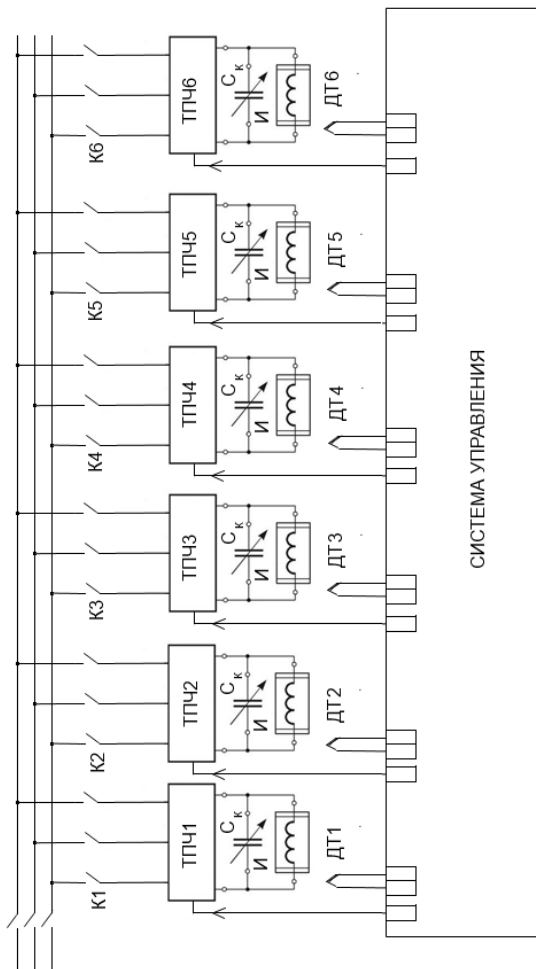


Рис.17. Упрощенная электрическая схема многосекционного индукционного нагревателя

При программном способе регулирования в многосекционном нагревателе используется алгоритм включения, отличающийся тем, что запуск системы осуществляется при поочередном включении секций: первая заготовка загружается в первую секцию с заданным заглублением. После включения секции индуктора и нагрева в течение заданного времени, происходит загрузка второй заготовки с

одновременным проталкиванием первой заготовки на одну позицию. Таким образом осуществляется поочередное включение всех секций индуктора. Во время пуска перемещение заготовок после шестого интервала нагрева производится на меньшее расстояние, чтобы обеспечить необходимо заглубление последней заготовки. Система управления, реализующая описанный алгоритм, может быть реализована на базе простых средств. Многоканальный регулятор мощности, построенный на логическом контроллере фирмы Овен, обеспечит выполнение поставленных задач.

Более сложный алгоритм для системы управления используется при реализации системы автоматического регулирования температуры. В работе определены параметры задающих воздействий для каналов управления температуры и скорости. При моделировании тепловых процессов рассмотрены режимы с высоким темпом выдачи, где задержка на десятки секунд из-за переключения уставок приведет к отклонениям температуры, превышающим допустимые. Построение системы регулирования производится на основе формально простого подхода, когда системы управления процессами нагрева и перемещения заготовок не зависят друг от друга.

В качестве регуляторов для многомерной системы управления достаточно стандартного набора из пропорциональных, дифференцирующих и интегрирующих звеньев. Наличие таких регуляторов определяется уровнем аппаратной части и возможностью эффективного использования в используемом программном обеспечении. В качестве платформы для системы регулирования возможно использование контроллера фирмы Siemens.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана численная математическая модель связанных между собой электромагнитных и тепловых полей в системе «многосекционный нагреватель – дискретная загрузка», ориентированная на решение задач управления нагревом в переходных и установившихся режимах.
2. Применение численных моделей расчета тепловых процессов, учитывающих взаимный лучистый теплообмен в системе заготовок и футеровок секций индуктора, позволило снизить погрешность расчета на 10 градусов.
3. Проведено исследование влияния термического сопротивления торцевых контактов между заготовками на распределение температуры по длине загрузки, что позволило определить диапазон изменения значений перепада температуры от 13 до 50 градусов в зависимости от эквивалентной толщины контактного слоя. Принятые параметры контактного слоя между заготовками многосекционного нагревателя обеспечили повышение точности расчетов температурного распределения с учетом максимальных тепловых потоков между заготовками.
4. Разработана система автоматического управления многосекционным индукционным нагревателем, отличающаяся учетом вариации параметров тепловыделения в заготовках, обусловленной их перемещением, и изменением, в связи с этим, числа независимых источников тепла в одной заготовке. Применение САР обеспечивает сокращение времени переходного режима на 50% по сравнению с системой программного управления

5. На основании проведенных исследований электромагнитных и тепловых процессов в индукционном нагревателе методического действия определен алгоритм поиска параметров управления в переходных режимах работы в условиях строгих ограничений на отклонения температуры от заданных значений, позволяющий получить требуемый по технологии перепад температуры по объему заготовки.

6. Разработан алгоритм перехода на другой тип заготовок с изменением функции распределения заданной температуры по длине загрузки и темпа выдачи. Алгоритмы управления мощностью секций нагревателя, полученные при анализе вариантов, позволяют для рассматриваемой номенклатуры заготовок исключить применение «ложных» слитков и минимизировать общее время нагрева.

7. Разработаны алгоритмы эффективного управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия в условиях нелинейной зависимости электрических параметров нагревателя, теплофизических характеристик заготовок и теплового потока излучением между поверхностями заготовок и футеровки от распределения температуры по длине, позволяющие за счет исключения ложных заготовок снизить затраты электроэнергии на 3300 кВт·ч (11900 МДж), что дает экономию более 7 тысяч рублей на каждой переходной операции.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях по перечню ВАК:

1. Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Животягин Д.А. Параметрический анализ и оптимальное проектирование индукционной системы по критерию максимального коэффициента полезного действия/ Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», 2018г., Вып. № 3 (59). С.143–154

2. А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин. Система методического нагрева цилиндрических заготовок из сплавов алюминия. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», вып.28, №2, 2020г. С. 97–110.

3. А.И. Данилушкин, Д.А. Животягин, С.С. Кибкало, Д.В. Сурков  
Оптимизация электротехнологического комплекса для высокопроизводительных линий индукционного нагрева. // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки», №3, 2020г. вып.28, №3(67), 2020г. С. 94–109.

Работы, индексируемые в базе Scopus:

4. Danilushkin, A. I., Maksimova, M. A. & Zhivotyagin, D. A. Synthesis of the automatic control system the temperature of liquid flow with incomplete measurement the object state with distribution parameters. in Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020 (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020). doi:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112042

5. Danilushkin, A., Bazarov, A. & Zhivotyagin, D. Synthesis of algorithms and optimal control system of start-up modes of continuous induction installation. in Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020 (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020). doi:10.1109/ICIEAM48468.2020.9112041

Работы в других журналах и материалах научных конференций:

6. А.И. Данилушкин, Н.М. Давыдова, Д.А. Животягин. Исследование вентиляционного аппарата как объекта управления и постановка задачи управления. VIII МНПК «Актуальные проблемы энергетики АПК», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2017, с.51–53.

7. Данилушкин А.И., Животягин Д.А. Энергоэффективные режимы работы индукционных нагревателей в технологической линии обработки металла. 4-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении».

(18-19 февр. 2019г.) Сборник научных статей. Юго-Зап. гос. ун-т, г. Курск. С.82-85.

8. Д.А. Животягин, М.Г. Дуспулов, А.И. Данилушкин. Эффективность применения инфракрасной термографической дефектоскопии на электротехнологических установках. Сб. статей по материалам IV международной научно-практической конференции «Инновации в науке и практике» 19 декабря 2017г, г. Барнаул. В 4 ч. Ч.1/–уУфа: Изд. Дендра, 2017. С. 121–127.

9. Д.А. Животягин, асп., В.В. Романов, асп., рук. А.И. Данилушкин, д.т.н., проф. Исследование пусковых режимов двухсекционного индукционного нагревателя. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА.// 24 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов. Тез. докл. – М.: МЭИ, 15–16 марта 2018. Москва. С.480.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.04

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 6 от 12 октября 2020г.)

Заказ № . Тираж 100 экз.

Формат 60x84/16. Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244