

На правах рукописи

Ситько

Ситько Петр Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
МОДУЛЬНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ
СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальность: 05.09.10– Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), в межотраслевой лаборатории «Современные Электротехнологии» (МОЛ СЭТ).

Научный руководитель:

Демидович Виктор Болеславович
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина),
главный научный сотрудник МОЛ СЭТ

Официальные оппоненты:

Фролов Владимир Яковлевич
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет,
заведующий кафедрой электротехники и
электротехнологии

Михлюк Анатолий Игнатьевич,
кандидат технических наук, Физико-
технический институт Национальной
академии Беларуси, заместитель
директора по научной и инновационной
работе

Ведущая организация:

Федеральное Государственное
Унитарное Предприятие Всероссийский
Научно - Исследовательский Институт
Токов Высокой Частоты ВНИИТВЧ

Защита состоится "29" декабря 2014 г. в 17-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета, на сайте: www.eltech.ru

Автореферат разослан "28" октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:



М. П. Белов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Анализ международных тенденций и прогнозов применения индукционного нагрева показывает устойчивое расширение применяемых индукционных технологий в металлургической и металлообрабатывающей промышленности. В развитых индустриальных странах в настоящее время до 95% нагрева в кузнечном производстве осуществляется индукционным способом.

Наблюдающийся в последнее время прогресс в разработках источников питания внес серьезные изменения в архитектуру и построение кузнечных индукционных нагревателей. Этот процесс напрямую связан с появившейся возможностью сильно уменьшить габариты источников питания, с резко возросшей удельной емкостью электротермических конденсаторов, а также снижением габаритов и повышением эффективности теплообменников. Управление нагревателем стало цифровым, и появилась возможность реализации управления им по модели. Все это привело к тому, что в настоящее время у ведущих компаний, производящих индукционное оборудование, индукционный нагреватель представляет собой набор модулей, со своими встроенными преобразователями частоты, станциями охлаждения, конденсаторными батареями, локальными контроллерами. Нарращивание мощности и производительности индукционного нагревателя осуществляется увеличением числа модулей.

Достоинством модульных индукционных нагревателей для металлообрабатывающей промышленности является то, что такая структура значительно расширяет возможности управления нагревом и позволяет создать систему адаптивного многозонного нагрева заготовок, с несколькими индивидуально контролируемыми участками нагрева, питание которых происходит от индивидуальных преобразователей частоты. При проектировании индукционных нагревателей в основу проектного решения, как правило принимается анализ его работы в установившемся режиме, однако, в работе индукционного нагревателя значительное время занимают различного рода неустановившиеся, переходные процессы. Поэтому для реализации преимуществ индукционных нагревателей модульной структуры необходима системы управления, которая оптимизирует режимы работы оборудования по различным критериям, таким как энергопотребление, форма температурного профиля загрузки, производительность, а так же позволит эффективно отработать возможные возмущения типа изменения скорости, диаметра заготовки, начальной температуры и тем самым минимизировать количество брака при нагреве.

На сегодняшний день наиболее распространенным техническим решением при крупносерийном ритмичном производстве является создание систем автоматического управления, работающих по программе. Такой подход широко используют ведущие Российские и зарубежные организации, разрабатывающие и производящие индукционные нагреватели. Однако, как отечественные, так и зарубежные системы управления модульными индукционными нагревателями редко используют обратную связь по температуре для управления. Обычно

пирометр на выходе из индукционного нагревателя только используется для отбраковки заготовок по температуре.

В связи с этим в работе исследован принцип построения системы управления модульной индукционной установкой с использованием обратной связи по температуре в определенной точке внутри нагревателя, которая находится в «активной зоне» одного модуля.

Целью работы является исследование и разработка автоматизированных модульных индукционных нагревателей непрерывного действия стальных заготовок.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Разработка численных моделей модульных индукционных нагревателей непрерывного действия стальных заготовок.
2. Исследование параметров модульных индукционных нагревателей при стационарном режиме работы и во время переходных процессов.
3. Разработка и исследование алгоритмов управления индукционной установкой модульной структуры для поддержания работоспособности нагревателя при выходе из строя одного модуля.
4. Разработка и исследование алгоритмов управления индукционной установкой модульной структуры для оптимизации переходных процессов.

Методы исследования. Исследования электромагнитных и температурных полей, интегральных параметров индукционных систем проводились методами математической физики и вычислительной математики. Достоверность научных положений, представленных в диссертационной работе, подтверждается результатами моделирования с использованием апробированных программных средств и внедрением в производство, разработанных с их помощью индукционных установок.

Научная новизна и значимость работы состоит в следующем:

1. Разработана численная модель модульного индукционного нагревателя непрерывного действия с использованием для управления нагревом одного индукционного модуля в «активной зоне».
2. Разработан алгоритм управления индукционной модульной установкой для оптимизации переходных тепловых процессов при аварийном отключении одного из модулей без снижения производительности.
3. Разработан алгоритм управления индукционной установкой модульной структуры для оптимизации тепловых переходных процессов с использованием одного индуктора в «активной зоне», позволяющий оптимизировать тепловые переходные процессы, возникающие во время работы установки.
4. Разработана численная модель индукционного нагрева пучка проволоки в модульных индукционных нагревателях.

По результатам научных исследований получен патент РФ на полезную модель №136665 «Модульный индукционный нагреватель цилиндрических заготовок непрерывного действия»

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Реализованы в виде программ численные модели, позволяющие выполнить расчет тепловых и электромагнитных процессов в модульной индукционной системе и имеющие систему управления с обратной связью по температуре.
2. Реализован алгоритм управления модульной индукционной установкой для оптимизации переходных тепловых процессов при аварийном отключении одного из модулей, позволяющий продолжать работу без изменения производительности и без отклонения температуры заготовки.
3. Разработан принцип управления модульной индукционной установкой с использованием одного модуля в «активной зоне», который позволяет оптимизировать тепловые переходные процессы, возникающие в индукционной системе при пуске, изменении скорости или сечения заготовки.
4. Реализована в виде программы численная модель нагрева пучка проволоки в модульных индукционных нагревателях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Численная модель индукционного нагревателя непрерывного действия с системой управления с обратной связью по температуре в задаваемой точке.
2. Алгоритм управления режимом работы модульной индукционной установки, обеспечивающий непрерывную работу установки с минимальным отклонением температуры заготовки при отключении одного из модулей.
3. Принцип построения системы управления для оптимизации переходных процессов в индукционной системе модульной структуры с использованием одного индуктора в «активной зоне».
4. Модель нагрева пучка проволоки в модульных индукционных нагревателях.

Внедрение результатов. Научные и практические результаты, полученные в диссертации, использованы при проектировании: индукционной установки для нагрева стальной холоднокатаной ленты, которая внедрена в производство на предприятии ООО «СтройПрофиль» (г. Орел), индукционной установки для нагрева прутков перед пластической обработкой, которая внедрена в производство на предприятии ООО «ММК-Метиз» (г. Магнитогорск), а так же научные результаты были внедрены в курсе "Численные методы в теории электромагнитной обработки материалов" для магистрантов кафедры ЭТПТ СПбГЭТУ(ЛЭТИ).

Апробация работы. Основные положения и научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и конференциях кафедры ЭТПТ и МОЛ СЭТ СПбГЭТУ (2010 – 2014), на международной конференции «13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components» ICEEE-2010 (Alushta, 2010), на XVI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА", (Москва, 2010г), на третьей международной конференции «МЕТАЛЛУРГИЯ-ИНТЕХЭКО-2010», (Москва, 2010г), на международном молодежном форуме «Энергоэффективные электротехнологии» (Санкт-Петербург, 2011), на всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-11, (Екатеринбург, 2011г), на всероссийской конференции с элементами научной

школы для молодежи «Проведение научных исследований в области энергетики и энергосбережения» (Санкт-Петербург, 2011г), на 27-ом международном конгрессе UIE-2012 (Санкт-Петербург, 2012), на международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2012» (Алушта, 2012), на 3-й международной конференции «актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-2014, Екатеринбург, 2014 г, на международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2014» (Алушта, 2014), на VII международном форуме «Энергосберегающие технологии в промышленности» на базе НИТУ «МИСиС» (Москва, 2014)

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 18 работах, среди которых 6 работы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых в действующем перечне ВАК, 4 – материалах всероссийских конференций и форумов, 7 работы – в материалах международных конференций и форумов и 1 – в иностранных издательствах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 80 наименований. Работа изложена на 131 листах машинописного текста и содержит 59 рисунков и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель ее проведения, излагаются основные концепции, лежащие в основе работы и определяющие ее структуру и методы исследования.

Первая глава посвящена обзору используемых индукционных нагревателей непрерывного действия в черной металлургии. Сделан обзор исторического развития применяемых в кузнечном производстве индукционных нагревателей. Выполнен анализ работ, в результате которого выявлены основные недостатки существующих кузнечных индукционных нагревателей, и показаны преимущества индукционных нагревателей модульной архитектуры и дальнейшие перспективы их развития.

Во второй главе рассмотрены принципы построения электротепловых моделей, которые учитывают взаимное влияние электромагнитных и температурных полей в стационарных режимах работы устройств индукционного нагрева (УИН) и во время переходных процессов в них. Расчет электромагнитных и тепловых полей, который позволяет обеспечить адекватность разрабатываемых моделей реальным процессам нагрева заготовок, может осуществляться различными методами, в частности методом интегральных уравнений (МИУ), метод конечных разностей (МКР) или метод конечных элементов (МКЭ), или их комбинацией, но алгоритм расчета электротепловых процессов одинаков.

На первом этапе производится первичная обработка исходных данных, в том числе формирование пространственной сетки тепловой задачи, аппроксимация таблично заданных тепло- и электрофизических свойств, зависящих от температуры, установление эквивалентных граничных условий для тепловой задачи, разбиение загрузки на элементы для электрической задачи. Затем производится расчет электрических параметров системы и распределения источников теплоты. Каждая обмотка индуктора заменяется тонким соленоидом с

собственным активным сопротивлением r_1 , которое задается при вводе данных или рассчитывается в программе по формуле

$$r_1 = \frac{2\pi(R_1 + \Delta_1/2)\rho_1 W^2}{l_1 \Delta_1 g},$$

где R_1 и l_1 - радиус и длина соленоида; W - число витков соленоида;

По методу импедансных граничных условий поверхность тела разбивается на кольцевые элементы с нулевым собственным активным сопротивлением. Эти фиктивные элементы замкнуты накоротко на комплексные сопротивления \dot{Z}_Q , которые определяются, согласно формулам

$$\dot{Z}_0 = \dot{E}_t / \dot{H}_t = \frac{\rho}{\Delta} (VR + jVX),$$

$$\dot{Z}_{Qi} = \frac{2\pi(R_{Qi} - \Delta_{Qi}/2)\rho_{Qi}}{l_{Qi}\Delta_{Qi}} (VR_i + jVX_i)$$

где R_Q и l_Q - радиус и длина элемента; ρ_Q и Δ_Q - удельное сопротивление и глубина проникновения тока в элементе; VR и VX - коэффициенты, которые определяются для каждого кольцевого элемента непосредственно из решения внутренней электрической задачи.

Решение системы нелинейных уравнений позволяет определить входные параметры индукционной системы, характеризующие ее как

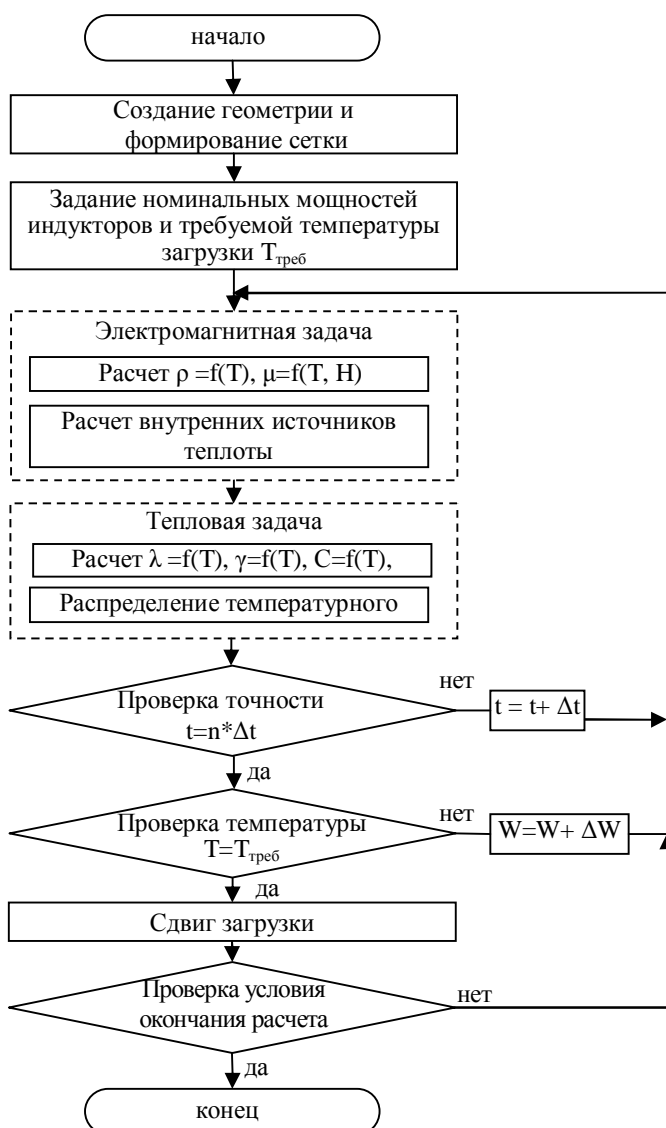


Рисунок 1 – Алгоритм совместного решения электромагнитной и тепловой задач при индукционном нагреве при наличии системы управления с обратной связью по температуре

нагрузку для источника питания. Так же решение внешней электрической задачи дает количественную картину распределения напряженности магнитного поля на поверхности загрузки и тем самым создает необходимые предпосылки для решения внутренней электротепловой задачи.

Для индукционных систем с охватывающими цилиндрическим или овальными индукторами удалось создать пространственно двухмерные (для цилиндрических тел) и пространственно трехмерные (для заготовок с прямоугольным или произвольным поперечным сечением) электротепловые модели в среде UNIVERSAL.

Решение внутренней электротепловой задачи дает количественную картину распределения электромагнитного и температурного полей внутри нагреваемой заготовки и позволяет рассчитать импедансные условия на поверхности тела, необходимые для решения внешней задачи.

Для расчета двумерных и трехмерных температурных полей в заготовке используется идея локально-одномерной схемы.

Так же в этой главе рассмотрены алгоритм управления модульной индукционной установкой для оптимизации переходных тепловых процессов при аварийном отключении одного из модулей, который позволяет продолжать работу без изменения производительности и без отклонения температуры заготовки, и алгоритм управления модульной индукционной установкой с использованием одного модуля в «активной зоне», который позволяет оптимизировать переходные процессы возникающие в индукционной системе при пуске, изменении скорости или сечения заготовки.

Также в среде Universal 2D разработана программа расчета пучка проволоки в овальных индукторах.

При моделировании применялись следующие допущения:

- нити проволоки расположены в одной плоскости в овальном индукторе на расстоянии 10...15 мм друг от друга;
- электромагнитное воздействие проволок в пучке друг на друга считалось пренебрежимо малым и не учитывалось.

Это позволяет трехмерную задачу (в случае пучка проволоки) свести к двумерной осесимметричной задаче без существенной потери точности.

В третьей главе на основе разработанной численной модели исследованы переходные процессы в индукционной системе модульной структуры при аварийных ситуациях и при использовании системы управления с одним индуктором в «активной зоне». На первом этапе исследования в программном пакете UNIVERSAL 2D были направлены на то, чтобы определить какие дополнительные возможности дает модульная структура индукционного нагревателя для управления нагревом, и какие технологические преимущества при индукционном нагреве даст модульная структура нагревателя.

Второй этап включал в себя исследование работы модульного индукционного нагревателя при аварийном отключении одного из модулей на примере установки из шести модулей. Для решения задачи исследования переходных тепловых режимов необходимо отработать шесть ситуаций, наиболее вероятных в процессе работы установки, т.е. отключение каждого из шести модулей установки. В момент отключения одного из модулей система управления процессом нагрева реагирует немедленно путем перераспределения мощности между рабочими модулями. Это осуществляется изменением напряжения, подаваемого на соответствующие индукторы.. При этом необходимо, чтобы выход из строя любого из модулей не сказался критически на работе установки в целом. При включении вышедшего из строя модуля в работу вновь возникает переходный процесс, обусловленный обратным перераспределением мощностей между всеми модулями. Были проанализированы скачки температуры, возникающие в переходных процессах в различных режимах работы нагревателя,

чтобы оценить, как сбои в работе одного из модулей влияют на конечную температуру заготовки, и как зависит конечный результат от того, какой именно модуль выходит из строя и как необходимо перераспределять мощность между рабочими модулями для сохранения работоспособности установки в целом.

Третий этап исследований был посвящен исследованию регулирования нестационарных режимов работы модульных индукционных нагревателей с целью определить возможности снижения изменений температурного поля загрузки на выходе индукционного нагревателя при помощи с одной точкой контроля температуры внутри УИН при регулировании нагрева во время переходного процесса, т.е. только одним индукционным модулем (активной зоной)(рис. 2).

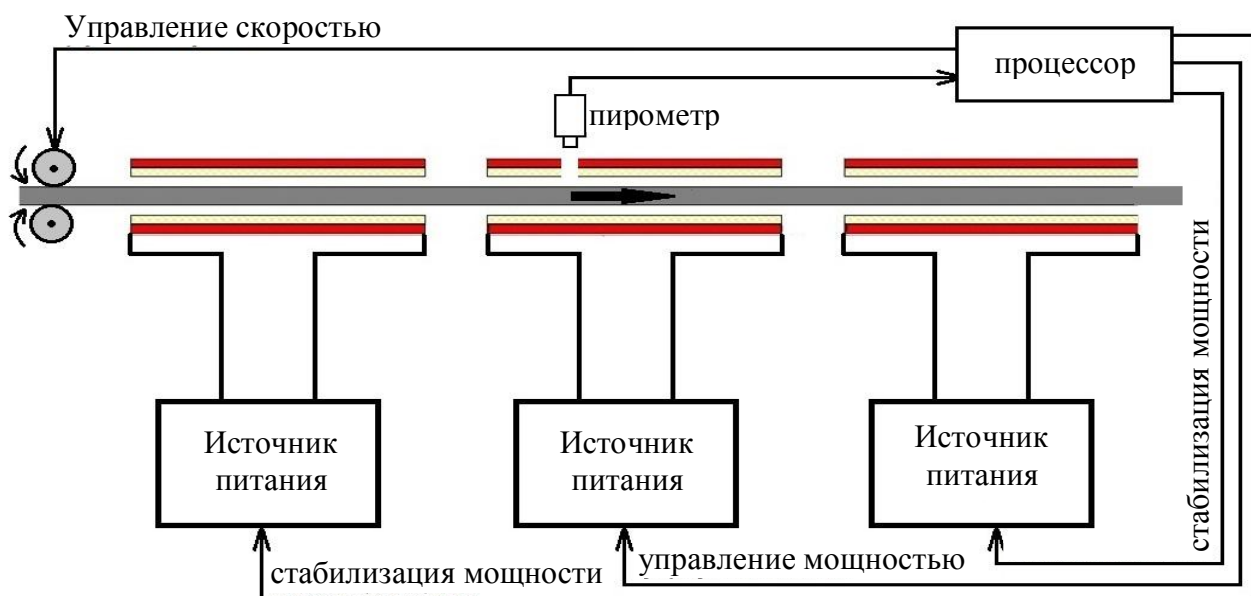


Рисунок 2 – Схема системы управления модульным индукционным нагревателем с регулированием нагрева одним индукционным модулем (активной зоной)

Из рисунка 3 видно, что температурные кривые при таком способе управления, полученные для различных производительностей, пересекаются в одной точке внутри второго индукционного модуля, а так же имеют одинаковую температуру на выходе из индукционного нагревателя. Вследствие чего можно утверждать, что при поддержании постоянной температуры в точке пересечения температурных кривых, путем создания системы автоматического регулирования с обратной связью по температуре, фиксируемой оптическим пирометром в точке контроля, то данный метод регулирования позволяет практически полностью убрать колебания температуры загрузки на выходе индукционной нагревательной установка во время переходных процессов во время работы установки (рис. 4)

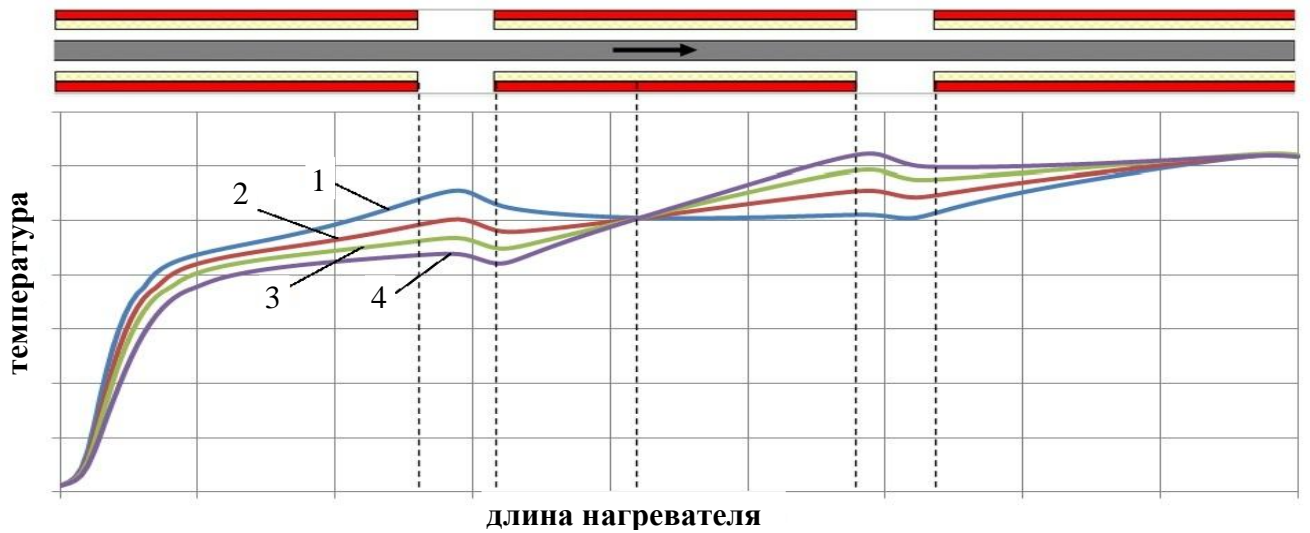


Рисунок 3 – Распределение температурного поля на поверхности заготовки по длине модульного индукционного нагревателя при регулирование нагрева одним индукционным модулем при различных производительностях: 1 – 3.5 т/ч, 2 – 4.125 т/ч, 3 – 4.7 т/ч, 4 – 5.5 т/ч

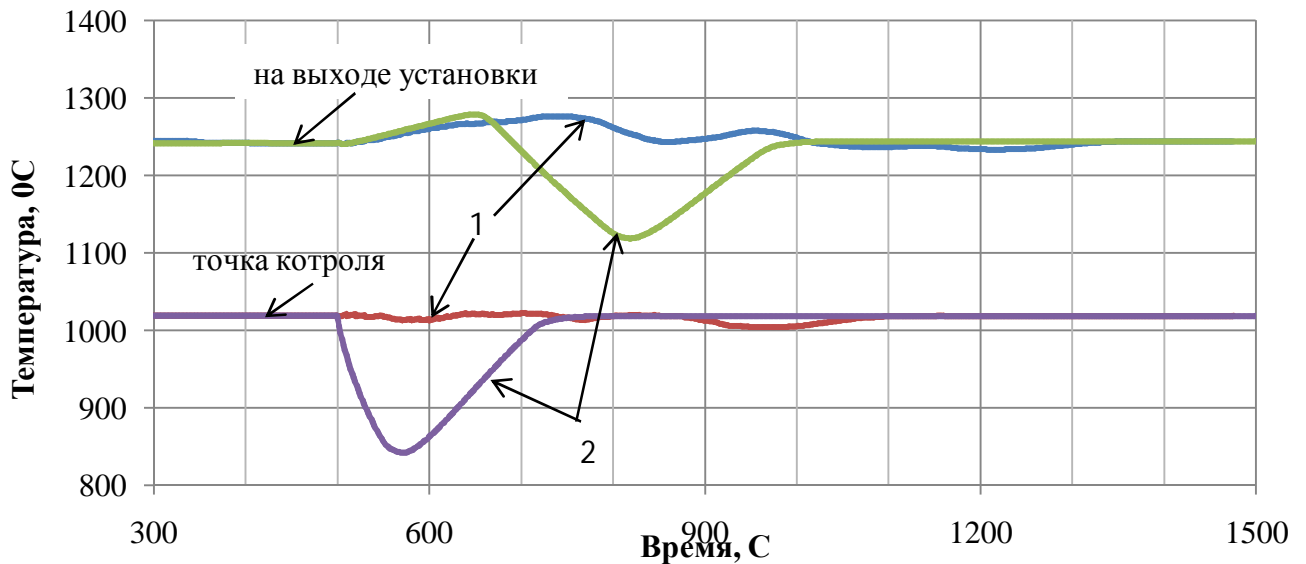


Рисунок 4 – График изменения температуры поверхности заготовки при использовании САУ одной точкой контроля (1) и САУ с программным управлением (2) во время переходного процесс при изменении производительности с 4.7 т/ч до 3.5 т/ч

Отдельно были рассмотрены случаи регулирования переходных процессов во время первоначального пуска с пустого индуктора и во время разгрузки индукционной системы. При старте на индукторах задается номинальное напряжение, а когда край заготовки доходит до точки пирометрического контроля, включается в работу система управления, которая производит корректировку нагрева торцов с целью компенсировать влияние краевых эффектов. Как видно из рисунка 5 использование системы управления с обратной связью по температуре фиксируемой в центральном модуле позволяет в значительной мере сократить или даже полностью избежать некачественного нагрева заготовок, тем самым снизив количество брака.

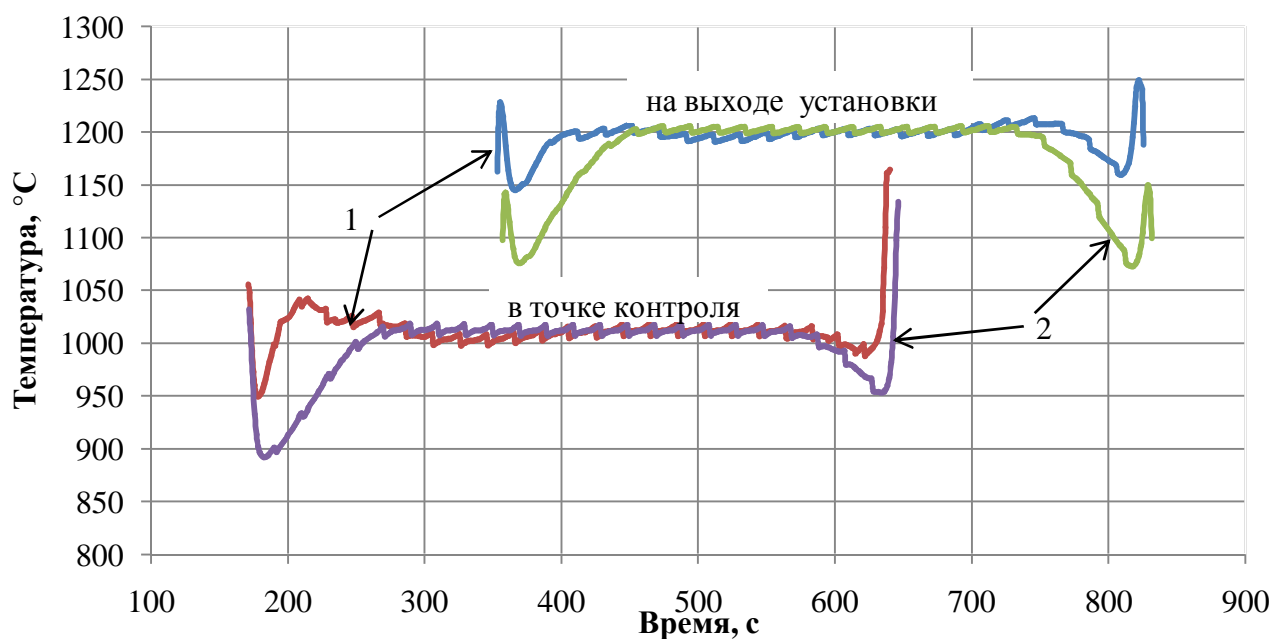


Рисунок 5 – График изменения температуры поверхности заготовки при использовании САУ 3-его типа с одной точкой контроля (1) и при работе 2-ого индуктора на номинальном напряжении(2)

Таким образом, можно сказать, что рассматриваемая САУ с зонным управлением позволяет гибко и точно адаптировать модульный индукционный нагреватель при работе с изменяющимися производительностью и сортаментом нагреваемых заготовок, сохраняя при этом высокую энергоэффективность системы и максимально возможную стабильность технологического процесса.

В четвертой главе на основе разработанной численной модели исследован метод индукционного нагрева проволоки в модульных индукционных нагревателях и исследованы переходные процессы при нагреве проволоки.

Обычный индукционный нагрев тонкой проволоки в диапазоне средних частот неэффективен из-за чрезмерной величины кольцевого зазора между проволокой и индуктором, а также из-за большой глубины проникновения тока на этих частотах, соизмеримой с диаметром проволоки. Технически сложно изготовить индуктор, внутренний диаметр которого сопоставим с диаметром проволоки.

КПД индуктора при нагреве стальной проволоки можно повысить путем увеличения ее магнитной проницаемости. Достигается это повышением частоты тока и уменьшением напряженности магнитного поля, что приводит к увеличению длины индуктора при неизменной мощности. Другим путем повышения эффективности индукционного нагрева движущейся проволоки является совершенствование конструкции индукционного нагревателя.

Если использовать индуктор для нагрева одной нити тонкой проволоки, то достичь высоких значений КПД будет проблематично. При производстве проволоки на многониточных устройствах можно производить отжиг не одной нити, а нескольких одновременно.

Оценка эффективности применения средне и высокочастотного индукционного нагрева как одной нити стальной проволоки, так и пучка проволоки проводилась на математической модели, разработанной в среде Universal 2D.

В результате моделирования получены минимальные значения частоты при индукционном нагреве проволоки сечением от 1 до 8 мм, при которых при нагреве до 700 °С КПД установки достигает 70% и считается эффективным.

На рисунке 6 показан КПД индукционной установки при нагреве до 700 °С одной нити проволоки различных диаметров. Из рисунка видно, что при нагреве проволоки диаметром до 1 мм КПД индукционной установки не превышает 0,5. Повышение частоты не дает существенного изменения показателей. Индукционный нагрев становится эффективным при нагреве одной нити проволоки, начиная с толщины 3 мм, частота тока при этом составляет 66кГц. Дальнейшее увеличение диаметра приводит к резкому снижению минимальной частоты тока необходимой для эффективного нагрева.

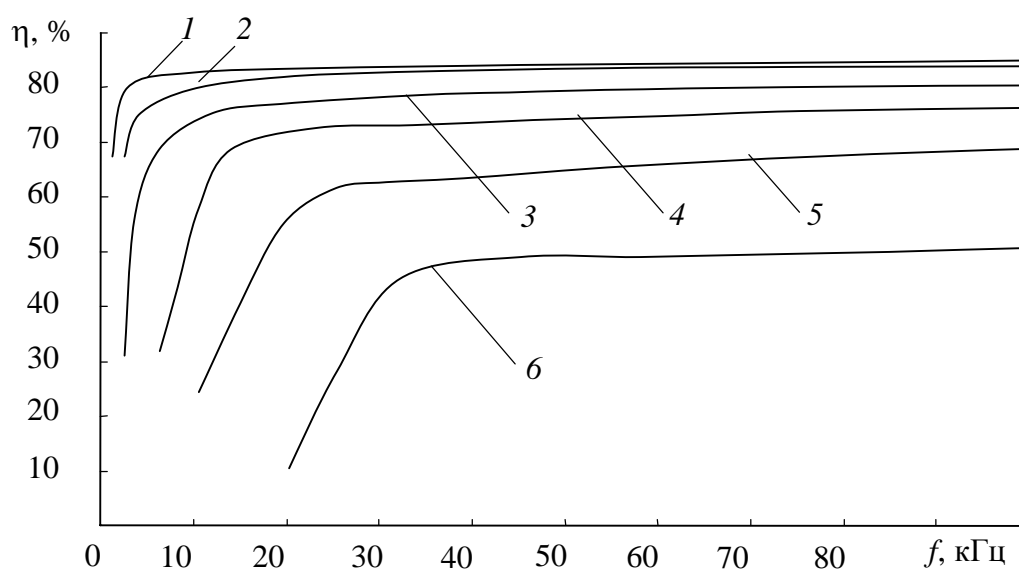


Рисунок 6 – КПД индукционной установки при нагреве до 700°С одной нити проволоки различных диаметров: 1 – 8 мм, 2 – 6 мм, 3 – 4 мм, 4 – 3 мм, 5 – 2 мм, 6 – 1 мм

Объединение проволоки в пучок по несколько нитей позволяет повысить значение КПД. Для проволоки толщиной 1мм нагрев на частоте 100 кГц становится эффективным (КПД 0.7) уже при объединении в пучок пяти нитей проволок. Аналогичная картина наблюдается при дальнейшем увеличении диаметра проволоки. Как указывалось выше, начиная с толщины проволоки 3 мм и более эффективным становится нагрев даже одной нити проволоки. Объединение проволок в пучок и в этом случае позволит не только повысить КПД установки, но и даст возможность использовать более низкую частоту тока(рис. 7).

Проведенные теоретические исследования показали, что количество нитей проволоки любого сечения в пучке оказывает существенное влияние на величину КПД при количестве проволок в пучке до 4–5 штук, при дальнейшем увеличении количества нитей значение КПД стабилизируется.

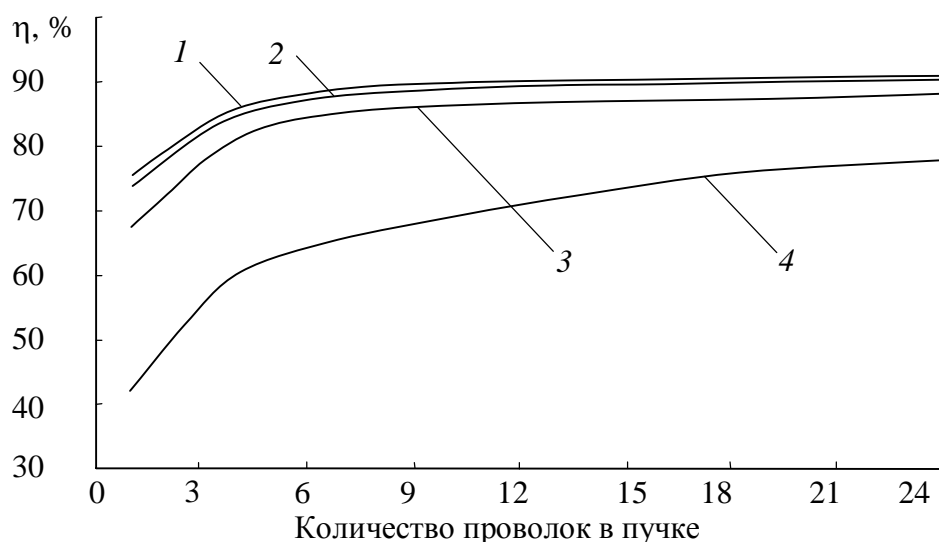


Рисунок 7 – КПД индукционной установки при нагреве проволоки диаметром 3 мм до 700 °С на нескольких частотах: 1 – 66 кГц, 2 – 30 кГц, 3 – 10 кГц, 4 – 4 кГц

Современные генераторы, позволяющие работать в более широком диапазоне частот, благодаря чему способны отслеживать и изменять выходную частоту в широком диапазоне частот, что позволяет подключить к ним индукционную нагревательную печь для термообработки проволоки с различным количеством нитей в пучке. Частоту генерации можно изменять в зависимости от количества и диаметра нитей проволоки, таким образом, сохраняя максимальный КПД системы в целом. Также результаты моделирования показали, что можно выбирать размер индуктора не для конкретного количества проволок, а допускается некоторое его уменьшение, но не более чем в два раза.

Также были исследованы переходные процессы в индукционных нагревателях, которые могут возникать вследствие воздействия на систему возмущающих воздействий. Это может быть изменение мощности индукционной нагревательной установки, диаметра загрузки или скорости ее движения. Моделирование было проведено для проволок диаметрами от 1 мм до 8 мм. При этом следует отметить, что как теплотехнически тонкое тело слабо чувствительна к внешним возмущениям во время индукционного нагрева, так изменение скорости проволоки в 1.5 – 2 раза вызывают температурные колебания всего в 3-5 градусов, что позволяет относительно легко регулировать процесс нагрева во время работы установки.

В пятой главе на основе разработанных численных моделей с использованием программных пакетов Universal3D и DTM была проведена разработка модульного индукционного нагревателя непрерывного действия для производственной линии цинкования стальной ленты шириной до 300мм и толщиной от 1мм до 4мм. Проводился расчет электромагнитных и температурных полей и моделирование всей установки с оптимизацией по критериям:

- обеспечение отклонения температуры по ширине ленты не более 10-15 °С
- минимизация энергозатрат на нагрев
- обеспечение максимальной производительности при выполнении двух предыдущих критериев

Моделируемая нагревательная установка состоит из двух индукционных модулей с индукторами, имеющими размеры: длина 400 мм, ширина 370 мм, высота 40 мм. При моделировании индукционного нагрева стальной ленты использовались частоты 4 кГц и 10 кГц. В процессе исследования были рассмотрены варианты нагрева как на одной из частот, так и двухчастотный нагрев.

Полученные для частоты 4 кГц результаты показали, что индукционная установка имеет крайне низкий КПД при нагреве ленты толщиной 1 мм и узких (от 25 до 50 мм) лент толщиной до 2 мм, что приводит к низкой производительности и высокому удельному расходу энергии. Нагрев всех остальных лент осуществляется с достаточно высоким КПД, производительностью. Также следует отметить, что даже при максимально возможной производительности, частота 4 кГц обеспечивает в большинстве случаев близкое к требуемому качество нагрева.

Полученные для частоты 10 кГц результаты показали, что индукционная установка имеет значительно более высокие энергетические показатели при нагреве ленты толщиной 1 мм и узких (от 25 до 50 мм) лент толщиной до 2 мм, чем в первом случае. Нагрев остальных лент дал схожий результат с нагревом на 4 кГц, за исключением качества нагрева лент толщиной 3 – 3,9 мм. При нагреве этих лент наблюдается существенная неравномерность температуры по ширине ленты.

Вариант нагрева ленты с использованием комбинации частот 4 кГц и 10 кГц показал, что использование двух частот нагрева позволяет, находить оптимальное соотношение между мощностью нагрева на каждой из этих частот для удовлетворения требований по качеству нагрева и достижения высоких энергетических показателей при максимальной для этих условий производительности.

Также в ходе моделирования были изучены возможности по регулированию характера теплового переходного процесса, происходящего при смене сортамента без изменения скорости движения ленты.

Из рисунка 8 видно, что использование простых алгоритмов, т.е. управляемый параметр преобразователя (мощность или напряжение) изменяются скачкообразно, изменения мощности индукционных модулей позволяет только минимизировать отклонение температуры ленты от заданной, а не устранить его полностью. Наилучшего результата позволяет добиться метод регулирования, когда переключение индукционных модулей происходит поочередно не зависимо друг от друга, но при таком методе регулирования требуется более сложная система регулирования, так необходимо отслеживать положение сварного шва на протяжении всей зоны нагрева, в то время как остальные представленные варианты требуют наличие датчика контроля только либо в начале, либо в середине, либо в конце зоны нагрева. Также следует отметить, что в производственном процессе необходимо организовывать порядок смены сортамента так, чтобы толщины ленты либо только возрастали, либо убывали, так как в зависимости от этого практически зеркально меняется характер переходного процесса

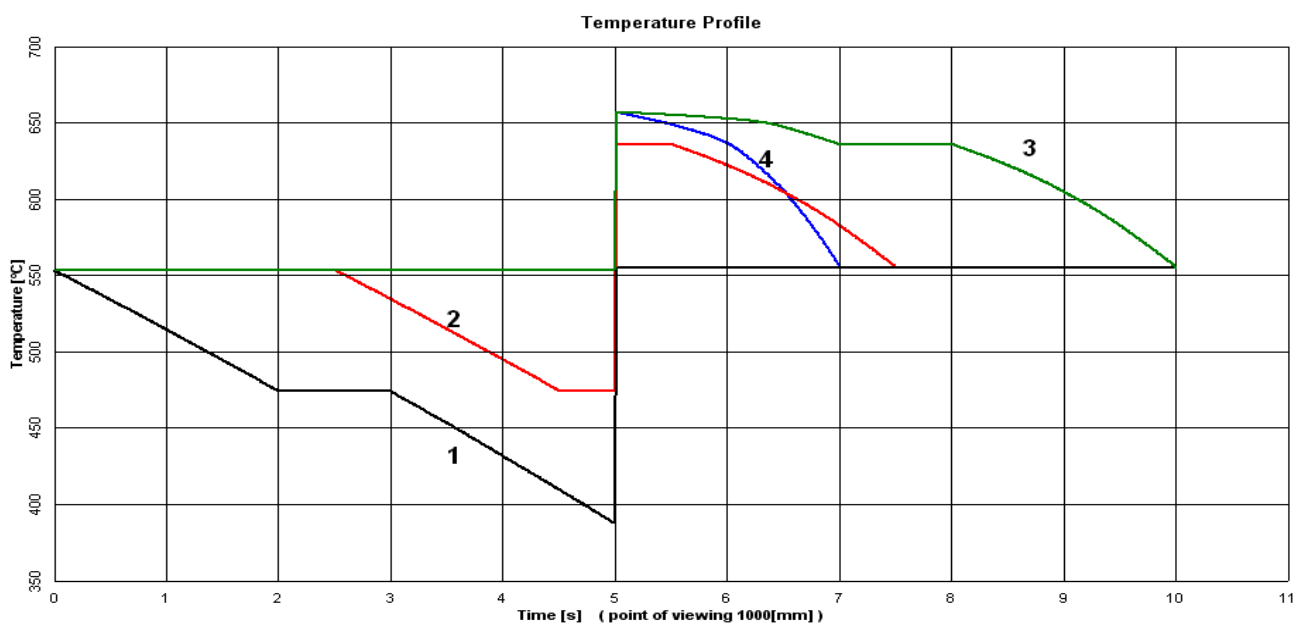


Рисунок 8 – температура на выходе второго индуктора, переход с ленты 237x1.8мм на ленту 234x2.7мм, скорость движения ленты 12 м/мин, при этом суммарная мощность индукторов изменяется с 200кВт на 300кВт. Изменение мощности индукторов происходит:

- 1 – одновременно, в момент времени выхода сварного шва из второго индуктора;
- 2 – одновременно, в момент времени нахождения сварного шва посередине между индукторами;
- 3 – одновременно, в момент времени входа сварного шва в первый индуктор;
- 4 – поочередно, в моменты времени выхода сварного шва из каждого конкретного индуктора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен анализ состояния уровня техники в области разработок проходных кузнечных индукционных нагревателей в металлургической и металлообрабатывающей промышленности, в результате которого выявлены основные недостатки существующих технологий, и показана перспективность модульной структуры нагревателей с системой управления по активной зоне.

2. Разработана в среде UNIVERSAL 2D численная модель расчета нагрева заготовки с системой управления с обратной связью по температуре в задаваемой точке.

3. Разработан алгоритм управление индукционной установкой модульной структуры для оптимизации переходных процессов при аварийном отключении одного из модулей.

4. Разработана и внедрена в производство модульная индукционная установка для нагрева стальной холоднокатаной ленты.

5. Разработана численная модель индукционного нагрева пучка проволоки.

6. Исследован вопрос выбора частоты при индукционном нагреве пучка стальной проволоки.

7. По результатам научных исследований получен патент РФ на полезную модель №136665 «Модульный индукционный нагреватель цилиндрических заготовок непрерывного действия»

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК:

1. Ситько П.А. Моделирование тепловых переходных режимов в индукционных нагревателях прутков [Текст] / Демидович В.Б., Масликов П.А., Баранкова И.И., Ситько П.А. // Индукционный нагрев.- 2009.- Вып. №3 (9), С. 11-15.
2. Ситько П.А. Пути повышения эффективности применения технологии индукционного нагрева при термообработке проволоки / Баранкова И. И., Демидович В. Б., Ситько П. А [Текст] // Индукционный нагрев.- 2010.- Вып. №2 (12), С. 4-9.
3. Ситько П.А. Повышение эффективности индукционного нагрева при термообработке проволоки / Баранкова И. И., Демидович В. Б., Ситько П. А [Текст] // Электromеталлургия – 2011- Вып. №7, С. 16-22.
4. Ситько П.А. Моделирование и оптимизация индукционных нагревателей мерных заготовок в кузнечном производстве / Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А. [Текст] // Индукционный нагрев.- 2013.- Вып. №2 (24), С. 15-17.
5. Ситько П.А. Модульные индукционные установки в кузнечном производстве / Демидович В.Б., Оленин В.А., Григорьев Е.А., Ситько П.А. [Текст] // Индукционный нагрев.- 2013.- Вып. №4 (26), С. 9-12.

Публикации, входящие в перечень SCOPUS:

6. Sitko P.A. Increase in the efficiency of induction heating during heat treatment of wires (Повышение эффективности индукционного нагрева при термообработке проволоки) [Текст] / Barankova I.I., Demidovich V.B., Sitko P.A. // Russian Metallurgy (Metally) vol. 2012, №6 , pp. 552-557.
7. Ситько П.А. Моделирование индукционного нагрева стальной проволоки / Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Ситько П.А. // Электричество. 2014. № 8. С. 62-67.

Другие публикации:

8. Ситько П.А. Моделирование тепловых переходных режимов в проходных модульных индукционных нагревателях [Текст] / Ситько П.А., Демидович В.Б.// материалы XVI международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА" , Москва, МЭИ , 2010г.
9. Ситько П.А. Энергосберегающие технологии индукционного нагрева в черной металлургии [Текст] / Демидович В.Б, Баранкова И.И., Ситько П.А // материалы третьей международной конференции «МЕТАЛЛУРГИЯ-ИНТЕХЭКО-2010», Москва , 2010г, С 25-29.
10. Ситько П.А. Пути повышения эффективности применения технологии индукционного нагрева при термообработке проволоки [Текст] / Демидович В.Б., Ситько П.А. // материалы Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения» , Уфа , 2010г, С 94.
11. Ситько П.А. Установки индукционного нагрева проволоки [Текст] / Демидович В.Б., Баранкова И.И., Ситько П.А. // материалы Всероссийской научно-

технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-11, Екатеринбург, 2011г.

12. Ситько П.А. Применение индукционного нагрева в линиях горячего цинкования стальной ленты и проволоки [Текст] / Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Оленин В.А., Ситько П.А. // материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-11, Екатеринбург, 2011г.

13. Ситько П.А. Применение индукционного нагрева в линиях горячего цинкования стальной ленты [Текст] / Ситько П.А. // материалы Всероссийской молодежной конференции "Актуальные проблемы электромагнитной обработки материалов" Санкт-Петербург, 2011г, С 43-44.

14. Ситько П.А. Методы повышения эффективности применения индукционного нагрева в метизной промышленности при термообработке проволоки [Текст] / Ситько П.А. // материалы Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области энергетики и энергосбережения» Санкт-Петербург, 2011г, С 29-30.

15. Sitko P. Modelling of thermal transient processes in through induction heating systems (Моделирование тепловых переходных процессов в проходных индукционных нагревательных системах) [Текст]/ Demidovich V., Skvortsov V., Sitko P. // ICEEE-2010 “13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components” Alushta, Crimea, Ukraine, – 2010, pp. 124.

16. Ситько П.А. Автоматизированные модульные индукционные нагреватели [Текст] // Демидович В.Б., Григорьев Е.А., Оленин В.А., Ситько П.А. / материалы 3 международной конференции «актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» АПЭЭТ-2014, Екатеринбург, 2014 г.

17. Ситько П.А. Система управления температурой заготовок в модульных кузнечных индукционных нагревателях [Текст] / Демидович В.Б., Оленин В.А., Ситько П.А. // материалы XV международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты МКЭЭЭ-2014» Алушта, 2014, С 258-259.

18. Ситько П.А. Энергосберегающие автоматизированные индукционные нагреватели в кузнечном производстве [Текст] / Демидович В.Б., Оленин В.А., Ситько П.А. // VII международном форуме «Энергосберегающие технологии в промышленности» на базе НИТУ «МИСиС» (Москва, 2014), С. 160-168.