

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе Животягина Дениса Александровича на тему: «Исследование и разработка алгоритмов управления переходными режимами индукционных установок методического действия для нагрева алюминиевых сплавов перед деформацией», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (80 наименования) и одного приложения и содержит 148 рисунков и 45 таблиц. Общий объем работы - 178 страниц. Автореферат диссертации имеет объем 21 стр.

Актуальность темы исследования

Разработка индукционных комплексов для нагрева крупногабаритных заготовок из алюминиевых сплавов уже длительное время остается актуальной задачей проектировщиков в связи с требованиями энергоэффективности и повышения качества продукции.. Еще в справочнике «Электротермическое оборудование», изданном в 1980 году, приведены характеристики индукционной установки методического действия для нагрева перед прессованием алюминиевых слитков диаметром до 410 мм и длиной до 1000 мм. Подобные установки разрабатывались и использовались и в других странах.

Развитие вычислительной техники позволило ставить новые задачи улучшения характеристик такого оборудования, в частности за счет совершенствования системы управления.

Диссертация Д. А. Животягина посвящена совершенствованию методик расчета режимов работы методического многосекционного индукционного нагревателя крупногабаритных заготовок из алюминиевых сплавов, обеспечивающих снижение энергозатрат в переходных режимах пуска или смены типогабарита заготовок. Сложность получения математического описания процессов нагрева в таких нагревателях связана не только с известными факторами (зависимостями электро- и теплофизических параметров загрузки от температуры, необходимостью учета взаимосвязи электромагнитных и тепловых полей в загрузке, изменением параметров загрузки по длине нагревателя), но и с наличием дополнительных контактных тепловых сопротивлений между заготовками, что также влияет на распределение температуры в загрузке.

В рассматриваемой работе это обстоятельство впервые (насколько мне известно) рассматривается и учитывается при расчетах характеристик индукционного нагревателя и разработке эффективных алгоритмов управления режимами нагрева.

Еще одним вопросом, рассматриваемым в диссертации, являются процессы включения методического нагревателя и смены типогабарита нагреваемых заготовок, названные автором переходными процессами. Существующие технологии методического нагрева крупногабаритных заготовок предусматривают использование ложных заготовок, которые приходится разогревать при каждом включении установки. Кроме непроизводительных затрат энергии это связано с большим временем выхода на заданный режим. Указанные проблемы

усугубляются частой сменой типогабарита заготовок, отличающихся размерами, массой и физическими характеристиками. Переход с одного типогабарита заготовок на другой требует изменения темпа выдачи и уставок задания температуры для каждой секции. Существующие алгоритмы предусматривают пошаговую коррекцию задания температуры за счет изменения мощности секций.

Оснащение системы индукционного нагрева, состоящей из нескольких индукторов, современными преобразователями частоты, позволяющими осуществлять плавное регулирование мощности и подстройку частоты тока, позволяет решить проблемы симметрирования нагрузки трехфазной сети и настройки нагрузочного контура на высокий коэффициент мощности. Одновременно решаются задачи регулирования распределения температуры по длине загрузки за счет автономного управления мощностью индукторов.

Еще одним фактором, усложняющим расчеты характеристик и решение задач управления, является то обстоятельство, что число заготовок, находящихся в нагревателе, не совпадает с числом индукторов (секций).

Поиск эффективных алгоритмов управления в данной ситуации возможен только на базе численных математических моделей, учитывающих указанные выше особенности рассматриваемых нагревателей. Можно отметить, что известные инженерные методики расчета оптимальных алгоритмов управления индукционными нагревателями для решения данной задачи не применимы.

Решаемая автором проблема повышения энергоэффективности рассматриваемого в диссертации класса индукционных нагревателей, отличающихся специфическими особенностями, имеет важное значение и является актуальной.

Оценка новизны и достоверности основных результатов диссертации

В диссертации впервые получены результаты, имеющие научную новизну:

- разработаны численные математические модели взаимозависимых электромагнитных и тепловых процессов в установках методического индукционного нагрева крупногабаритных заготовок из сплавов алюминия, позволяющие повысить точность расчетов в переходных и установившихся режимах работы;
- предложена методика поиска параметров управления многосекционным индукционным нагревателем в переходных и установившихся режимах, основанная на численном моделировании и позволяющая минимизировать время и затраты электроэнергии при смене типогабарита нагреваемых заготовок;
- разработаны алгоритмы управления многосекционным индукционным нагревателем методического действия, обеспечивающие функционирование замкнутой системы регулирования в условиях ограниченной наблюдаемости и управляемости с помощью программного управления уровнем максимальной мощности секций. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением корректных математических методов исследования и ком-

пьютерного моделирования с использованием апробированных пакетов программ для электромагнитных и тепловых расчетов.

Значимость результатов диссертации для науки и практики

Полученные в диссертации результаты являются основой инженерной методики, применяемой для определения изменяющихся во времени задающих воздействий и ограничений максимальной мощности в системе управления, обеспечивающих работу как в установленном режиме, так и в переходном режиме смены типогабарита заготовок.

Разработанные алгоритмы расчета электромагнитных и тепловых полей в переходных и установившихся режимах индукционной нагревательной установки методического действия позволяют определить параметры управления многосекционным индукционным нагревателем, обеспечивающие получение заданного распределения температуры с допустимыми отклонениями.

Применение разработанных алгоритмов управления процессом нагрева заготовок в многосекционном индукционном методическом нагревателе в переходных режимах работы обеспечивает снижение непроизводительного расхода энергии.

Научная и практическая значимость результатов работы подтверждается тем, что полученные в диссертации положения, выводы и рекомендации использованы при выполнении фундаментальных НИР, проводимых в Самарском государственном техническом университете по заданию Минобрнауки РФ, и в учебном процессе.

Практическая ценность работы подтверждена также Справкой об использовании результатов диссертации на Самарском металлургическом заводе.

Анализ и оценка содержания и оформления диссертации

Диссертационная работа представляет собой последовательное и аргументированное изложение решений поставленных авторов задач.

Во введении обосновывается актуальность работы, ставится цель и задачи, отмечается научная новизна и практическая значимость проведённых исследований.

В первом разделе выполнен обзор научных работ в области технологии индукционного нагрева, разработки математических моделей электромагнитных и тепловых полей, ориентированных на проектирование и управление индукционными нагревательными установками. Отмечена сложность задач при исследования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве в многосекционных индукционных установках методического действия. Показаны проблемы, связанные с разработкой алгоритмов управления переходными режимами многосекционных индукционных нагревательных установок методического действия и сформулированы основные задачи исследований, выполненных в диссертационной работе.

Во втором разделе рассматриваются вопросы математического моделирования электромагнитных и тепловых процессов в осесимметричной системе «индуктор – металл», приведен алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей в многосекционном нагревателе.

ле с дискретно перемещающейся загрузкой. Предложены различные алгоритмы, ориентированные на применение программного управления или замкнутой системы автоматического регулирования. При построении численных моделей использованы программные средства Elcut, Comsol. Учет особенностей теплообмена осуществлен при разработке модели тепловых процессов в системе «теплоизоляция нагревателя – загрузка». Тепловые потоки а загрузке рассчитаны с учетом термического сопротивления контактного слоя между заготовками.

Для поиска параметров программного управления электротепловыми процессами в системе «многосекционный индуктор – загрузка» предложена модель, позволяющая рассчитывать изменяющиеся во времени значения мощности тепловыделения и температуры в заготовках. Для управления переходными режимами предложена замкнутая система регулирования, моделирование которой выполнено на основе тепловой задачи с добавлением элементов измерения температуры в контрольных точках и расчета управляющего воздействия с помощью ступенчатых функций.

В третьем разделе выполнено исследование влияния температуры заготовок на электрические параметры секций индуктора. Произведен расчет частоты напряжения для обеспечения настройки на резонанс контура «индуктор – загрузка» при нагреве. Выполнен расчет параметров индукционной системы при программном управлении нагревом дискретно перемещающихся заготовок с использованием нелинейных электротепловых моделей. По результатам расчетов выявлено, что недостатком программного управления индукционным нагревом с одинаковым током секций индуктора является необходимость увеличения времени нагрева для достижения требуемого перепада температуры в заготовке. Показана целесообразность совместного использования программного управления и замкнутой системы автоматического регулирования.

В четвертом разделе рассмотрены вопросы разработки и технической реализации автоматической системы управления режимами работы многосекционного индукционного нагревателя методического действия. Расчетная модель построена с учетом тепловых процессов теплообмена между заготовками и футеровкой. Определение значений температуры для каждой секции выполнено на основе моделирования тепловых процессов в заготовках при применении САР. Исследовано влияние темпа выдачи заготовок на значения отклонения температуры от заданного распределения. Проведено исследование функционирования системы автоматического регулирования при разном числе каналов регулирования. Определена связь показателей качества регулирования и числа каналов управления.

На основе моделирования показана возможность перехода с одного на другой типогабарит заготовок без использования ложных заготовок и определены параметры управления индукционной установкой. Разработана структура автоматической системы управления индукционным нагревателем, обеспечивающей качественное функционирование в режимах пуска и смены типогабарита заготовок.

В заключении отражены основные выводы по результатам исследований, полученных в ходе выполнения диссертационной работы.

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 2 статьи в изданиях, проиндексированных в Scopus, 4 публикации в других российских изданиях.

Апробация диссертационной работы подтверждается также участием ее автора в научно-технических конференциях различного уровня

Замечания по диссертационной работе

1. В обзоре литературы в разделе 1 не рассматриваются работы ВНИИ электротермического оборудования (Чайкин П.М., Яицков С.А., Гитгард Д.А. и др.), Всесоюзного института легких сплавов (Коротков М.Я.) и МЭИ (Коломейцева М.Б.) по созданию индукционных установок для нагрева крупногабаритных заготовок и систем питания и управления для них. В частности ими был предложен ускоренный изотермический нагрев заготовок и применение пониженной частоты для питания индукторов. На стр.159 автор вновь возвращается к обзору литературы, при этом возможность использования нагрева заготовок при их вращении в магнитном поле для решения поставленной в диссертации задачи не рассматривается..
2. Не ясно, как проводилась проверка на адекватность разработанных моделей и как оцениваются погрешности результатов расчетов с их использованием. Например, на стр. 78 указано: «Суммарные значения мощности в заготовках отличаются на 1,3%», а на стр. 156 – «Разница значений коэффициента для минимального и максимального интервала нагрева (800 и 2000 с) составляет 0,004 ...». Видимо, эти цифры находятся в пределах погрешности расчетов, если учесть принятые допущения и неточности значений электро- и теплофизических параметров заготовок.
3. На стр. 71 написано: «Процесс перемещения ввиду его кратковременности и незначительного влияния на величину мощности не учитывается». На стр.72 указано: «Для удобства программирования скорость перемещения привязана к длине заготовки с целью обеспечения синхронизацию процессов». Не ясно, учитывается или не учитывается этот процесс при разработке программ?
4. В работе не рассматриваются вопросы термонапряжений в заготовке, которые и определяют допустимые перепады температуры в ходе нагрева (с учетом зависимости допустимых напряжений от температуры). В связи с этим некорректно использование среднего значения перепада температур между поверхностью и центром (стр.75)..
5. В работе сделан вывод (стр. 80 - 82. Рис.3.28) о том, что линейная электротепловая модель дает большую погрешность по сравнению с другими вариантами. При этом для данного (четвертого) варианта параметры приняты одинаковыми для всех заготовок и соответствующими температуре 230 градусов. Может быть, надо было подобрать другое, более удачное значение температуры, что упростило бы расчеты?

6. Определение значения теплового сопротивления между заготовками нуждается в экспериментальном подтверждении.
7. Другие замечания по работе.
 - Не понятно, зачем в работе упоминаются ток смешения (стр.45) и проблемы нагрева ферромагнитных материалов (стр. 48 и 61), так как эти вопросы не связаны с темой диссертации.
 - Используются необычные термины: «симметричные и несимметричные градиенты» (стр.20), «одинаковые электрические и магнитные поля»: (стр. 45), «мощность тепловых потерь в проводниках катушек индуктора» (стр.59), «эффективность управления» (стр. 124), «коэффициент эффективности энергозатрат» (стр.156), «взаимный лучистый теплообмен» (стр. 164). Вместо обычной для техники индукционного нагрева величины – удельной поверхностной мощности в работе используется удельная объемная мощность.
 - Все графические зависимости именуются диаграммами, даже в тех случаях, когда на графике имеется всего одна кривая (напр., Рис.3.20, Рис. 4.20, Рис.4.68, Рис.4.71).
 - В одном и том же смысле используются разные термины: «величина» и «значение», а также «интервал нагрева», «интервал выдачи» и «темп выдачи».
 - Необычны принятые буквенные обозначения коэффициентов конвективного теплообмена, теплопроводности и теплоемкости (в тексте h , k и C вместо a , λ и c).
 - Замечены ошибки: дважды пронумерован параграф 1.2 (стр.22 и стр.27) и пропущены слова на стр.27, 63, 71, 102, 112, 120, 151, 163.

Заключение

В целом, представленная диссертация с учетом научной новизны и практической значимости заслуживает положительной оценки, а указанные замечания не влияют на научную и практическую ценность полученных в диссертационной работе результатов.

Диссертация написана на хорошем научно-теоретическом уровне, выполнена на актуальную тему и содержит решение важной задачи повышения эффективности процессов индукционного нагрева крупногабаритных заготовок из алюминиевых сплавов в установках методического действия. Можно отметить большой объем проделанной автором теоретической работы, что связано со сложностью решаемых в ней задач моделирования электромагнитных и тепловых процессов. Разработанные математические модели индукционных нагревателей позволили решить задачи управления и оптимизации режимов их работы.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует научной специальности 05.09.10 – Электротехнология, так как в ней приведены исследования по расчету и оптимизации параметров электротехнологических индукционных нагревателей и систем управления, предназначенных для нагрева крупногабаритных слитков из алюминиевых сплавов.

Оформление работы соответствует установленным требованиям.

В диссертации четко определен вклад автора в разработку проблемы в работах, опубликованных коллективно с соавторами.

Основные результаты работы и выводы отражены в 9 публикациях, в том числе в трех статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования результатов кандидатских диссертаций.

Автореферат и опубликованные автором работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на хорошем научном уровне и содержащей результаты исследований процессов в индукционных нагревательных комплексах, которые имеют теоретическое и практическое значение для разработки систем управления с целью повышения энергоэффективности электротехнологического оборудования.

По объему проведенной работы, уровню и значимости полученных результатов диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Животягин Денис Александрович заслуживает присвоения ему искомой степени по специальности 05.09.10 – Электротехнология.

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Электроснабжение промышленных
предприятий и электротехнологии»
Национального исследовательского университета
«Московский энергетический институт»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

А. В. Кувалдин
20.11.20

А. В. Кувалдин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14
тел. +7 (495) 362-70-75
e-mail: kuvaldinab@mpei.ru

Подпись профессора Кувалдина А.Б.
Зам. начальника управле

Л. И. Полевая

С отуводи
считаю
Руководитель
27.11.20.