

На правах рукописи

Демидович Виктор Болеславович

**ТЕОРИЯ, ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2002

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Структурные изменения в металлургической промышленности, которые произошли в индустриально развитых странах в последней трети XX века, связаны главным образом с расширенным применением непрерывных процессов и электротехнологий. Плавка металлов в дуговых и индукционных печах занимала и ранее относительно большое место в металлургической промышленности. Однако особое значение индукционный нагрев получил в технологических процессах непрерывной разливки с последующей прокаткой, непрерывной термообработки и покрытия ленты защитными материалами, термообработки труб, штамповки сплавов в твердожидком состоянии и т.д. Компактные, практически без тепловой инерции и легко управляемые индукционные нагреватели идеально вписываются в непрерывные автоматизированные линии.

В настоящее время определились области потенциального расширенного использования индукционного нагрева в металлургической промышленности. Нагрев толстых слябов перед прокаткой может осуществляться индукционным способом от температуры окружающей среды до температуры прокатки. Однако наиболее экономически выгоден подход, который заключается в индукционном нагреве металла после выхода из газовой печи (800-1150°C) до температуры прокатки (1150-1250°C). При этом снижается стоимость нагрева тонны металла при существенном уменьшении окалинообразования и обезуглероживания.

Технология непрерывной разливки – непрерывной прокатки позволяет исключить зону хранения слябов и повторного их нагрева, что делает эту технологию энергосберегающей и существенно снижающей материальные затраты на производство тонны проката. Для согласования работы установки непрерывной разливки и прокатного стана может использоваться индукционный нагреватель, который позволяет гибко и оперативно корректировать и формировать температурное поле сляба, обеспечивая максимальную производительность стана и, главное, высокое качество прокатки. Роль индукционного нагрева возрастает при использовании его в современных новейших линиях разливки тонких слябов. Чрезвычайно эффективно применение индукционного нагрева для подогрева кромок тонких слябов.

Во всем мире значительно возросло производство листового проката с покрытием повышенной стойкости против коррозии, улучшенными свойствами свариваемости, окрашиваемости, пылезащищенности, что объясняется постоянным увеличением спроса автомобильной промышленности в данной продукции. Индукционный способ нагрева тонколистовых ферромагнитных материалов является одним из самых перспективных для применения в линиях непрерывного отжига, горячего цинкования, гальваники и других технологиях защитного покрытия листового проката.

Накопленный с 30х годов XX столетия опыт в таких областях металлообработки, как поверхностная закалка и сквозной нагрев металлов перед горячей обработкой давлением в кузнечном производстве, позволил уже в 50е-60е

годы XX века начать первые работы в СССР по широкомасштабному внедрению индукционного нагрева в металлургической промышленности.

Широкое распространение в СССР индукционный нагрев получил в трубном производстве. Индукционные нагреватели показали высокую эффективность в линиях с редуцированными станами, станами профильной прокатки труб, для гибки и термомеханического упрочнения труб. У истоков этих работ стояли сотрудники ЛЭТИ и ВНИИТВЧ (Слухоцкий А.Е., Бодажков В.А., Шамов А.Н. и др.).

Начиная с 60х годов, происходит активное вытеснение газовых и мазутных печей индукционными нагревателями цветных и легких металлов перед обработкой давлением. ВИЛС (Коротков М.Я.) разработал серию установок для нагрева алюминиевых заготовок перед прессованием. ВНИИЭТО (Москва) с филиалом в г. Истре проводили большие работы по созданию индукционных нагревателей медных, титановых и стальных заготовок перед прессованием, титановых и алюминиевых слябов перед прокаткой, бурильных труб для термообработки (Чайкин П.М., Простяков А.А., Яицков С.А. и др.). На ряде заводов пытались собственными силами внедрить индукционный нагрев в металлургическое производство, например, на КМЗ (Куйбышев) для нагрева алюминиевых слябов перед прокаткой (Зимин Л.С.).

В Западном полушарии до начала 90х годов практически полным монополистом в разработке индукционного нагревательного оборудования для металлургической промышленности была корпорация Ajax Magnethermic (USA). После эпохальной индукционной нагревательной установки стальных слябов мощностью 210 МВт, внедренной в 70х на McLouth Steel Corporation (Trenton, MI, USA), корпорация разработала ряд других нагревательных установок слябов с использованием так называемых индукторов Ross'a, а также около 30 индукционных нагревателей блюмсов и круглых заготовок мощностью 10-15 МВт каждая. В 80е годы корпорация Ajax Magnethermic разработала новую технологию нанесения антикоррозионного покрытия на стальную ленту для автомобильной промышленности (гальванилинг) с использованием индукционного подогрева ленты после выхода из ванны расплава Zn+Al. Фирма INDUCTOTHERM Inc.(USA), после открытия подразделения сквозного нагрева (Mass Heating Division, MI, USA) удачно вышла на рынок индукционного нагревательного оборудования для металлургической промышленности с установкой нагрева слябов 42 МВт для Geneva Steel (Provo, Utah, USA). В Европе и Азии успешно работают для металлургической промышленности ряд компаний из Франции, Германии, Японии, производящие индукционное оборудование.

Мощности установок индукционного нагрева в металлургической промышленности достигают нескольких десятков мегаватт. Цена ошибок при проектировании этих установок чрезвычайно высока. Однако отсутствие теории, учитывающей особенности проектирования и управления индукционными нагревателями в металлургическом производстве, препятствует распространению индукционного нагрева в металлургии, несмотря на то, что в будущем изменение структуры топливно-энергетического баланса делает электроэнергию наиболее перспективным энергоносителем для промышленного нагрева.

Цель работы. Разработка теоретических основ расчета и проектирования индукционных нагревателей для металлургической промышленности на основе разработанных электротепловых, многосвязных и многомерных моделей. Теоретическое обобщение, исследование и выявление основных закономерностей поведения электромагнитного и температурных полей, связанных с конечной длиной индукционных нагревателей и загрузки, а также с различными способами пространственного управления температурным полем в загрузке. Разработка методов оптимизации конструкции и режимов работы индукционных нагревателей. Разработка новой концепции и исследование характеристик универсальных индукторов для нагрева слэбов и лент.

Методы исследования. Исследования электромагнитных, тепловых полей и интегральных параметров индукционных систем проводились методами математической физики и вычислительной математики. Разработанные математические модели базировались на методе интегральных уравнений, методе конечных элементов, методе конечных разностей и их комбинациях.

Достоверность полученных результатов определялась сравнением расчетных результатов с экспериментальными и опубликованными в научной печати, перекрестными расчетами с использованием различных моделей, опытом эксплуатации внедренных индукционных нагревателей.

Научная новизна. В диссертационной работе:

- предложен и реализован комбинированный метод численного расчета электромагнитного (ЭМ) поля в индукционных нагревательных системах, заключающийся в комбинации методов интегральных уравнений для расчета ЭМ поля в области вне загрузки и методов конечных элементов или конечных разностей для расчета ЭМ поля внутри загрузки.

- разработаны теоретические основы расчета и проектирования индукционных нагревателей для металлургической промышленности на базе численных двух- и трехмерных электротепловых моделей.

- разработаны численные методы и алгоритмы оптимального управления и оптимального проектирования индукционных нагревателей с применением методов математического программирования, решена задача совместной оптимизации управления и проектирования индукционными нагревателями периодического действия на базе численных двухмерных моделей.

- получены обобщенные данные о предельно достижимой точности нагрева цилиндрических тел в зависимости от конструкции и режима работы индукторов.

- разработана новая концепция универсальных индукторов для нагрева тонких плоских тел, заключающаяся в возможности изменения фазы токов в противоположно расположенных обмотках индукторов, и использование которых позволяет нагревать стальную ленту до и выше температуры точки Кюри на одной частоте, а также перераспределять мощность по ширине полосы.

- выявлена особая точка в линиях непрерывной термообработки ленты с использованием индукционных нагревателей в промежутке между печами пламенного и радиационного нагрева, положение которой и уровень температуры ленты в этой точке не зависит от скорости и толщины ленты.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

Разработано прикладное программное обеспечение, которое широко используется в ведущих проектных организациях России и за рубежом. Разработанные модели вошли в практику исследования, проектирования и оптимизации индукционных нагревателей металлов, что позволило резко уменьшить объем экспериментальных исследований, сократить сроки и повысить качество проектирования, эффективно проводить работу по повышению качества готовой продукции.

На основе проведенных исследований сделаны обобщения и рекомендации по проектированию индукционных нагревателей, связанные с краевыми эффектами загрузки и индукторов, трехфазным питанием индукторов на промышленной частоте, средствами пространственного управления температурным полем и т.д.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. разработка и реализация комбинированного метода численного расчета электромагнитного поля в индукционных нагревательных системах.
2. численные модели совместного расчета электромагнитных и температурных полей в индукционных нагревателях для металлургической промышленности, образующих иерархическую структуру из пространственно одно-, двух- и трехмерных моделей.
3. методы и алгоритмы оптимального управления и проектирования индукционных нагревателей на базе численных двухмерных моделей с применением методов математического программирования.
4. теоретическое обобщение основных закономерностей поведения электромагнитного и температурного полей, связанных с конечной длиной индукторов и загрузки, а также с различными способами пространственного управления электромагнитным и температурным полем в загрузке.
5. разработка универсальных индукторов для нагрева плоских тел, позволяющая нагревать стальную ленту до и выше температуры точки Кюри на одной частоте, а также перераспределять мощность по ширине полосы.
6. существование особой точки в линиях непрерывной термообработки ленты, поддержание в которой постоянной температуры ленты позволяет оптимизировать тепловые переходные режимы в линии и снизить брак, связанный со сменой номенклатуры ленты.

Апробация работы. Результаты работы были доложены и обсуждены на конгрессах, конференциях, симпозиумах, коллоквиумах, семинарах и совещаниях, в том числе более чем на 30 международных и Всесоюзных: XII и XIII Международных конгрессах по электротермии (Монреаль, Канада, 1992, Бирмингем, Англия, 1996), Международном конгрессе по электромагнитной обработке материалов (Париж, Франция, 1997), III Международном симпозиуме по электромагнитной обработке материалов (Нагойя, Япония, 2000), 8 и 10 международных конференциях COMPMAG по вычислениям электромагнитных полей (Сорренто, Италия, 1991; Берлин, Германия, 1995), Всемирном электротехническом конгрессе (Москва, Россия, 1999), 9-ом международном симпозиуме по численным вычислениям электромагнитных полей в электротехнике (Грац, Австрия, 2000), Первом международном симпозиуме по

термообработке (Индианаполис, США, 1997), международных симпозиумах ISEF по электромагнитным полям в электротехнике (Павиа, Италия, 1987; Лодзь, Польша, 1989; Варшава, Польша, 1993; Гданьск, Польша, 1997; Павиа, Италия, 1999), 2-ой международной конференции по вычислениям в электромагнетизме (Ноттингам, Англия, 1994), на 3-ем и 5-ом международных семинарах по электрическим и магнитным полям – от численных моделей до промышленного применения (Льеж, Бельгия, 1996; Гент, Бельгия, 2000), на 1-ом и 2-ом международных семинарах IHS по индукционному нагреву (Падуа, Италия, 1998, 2001), 34, 40 и 43 научных коллоквиумах по электротермии (Ильменау, Германия, 1989, 1995, 1998), первой международной конференции по электротехнике и электротехнологии (Суздаль, Россия, 1994), VII и VIII Всесоюзном совещании по электротермии и электротермическому оборудованию (Новосибирск, 1979; Чебоксары, 1985), 8-й, 9-й, и 10-й Всесоюзных научно-технических конференциях “Применение токов высокой частоты в электротермии” (Ленинград, 1975, 1981, 1986), Международной научно-технической конференции “Современные проблемы и достижения в области электротехнологий в XXI веке” (Санкт-Петербург, 2001), а также на ряде других конференций и симпозиумов.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты связаны с выполнением работ в рамках НИР кафедры ЭТПТ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», а также в рамках ряда программ Министерства образования РФ и международных грандов, включая проект AZ I/69 382 Volkswagen-Stiftung.

Разработанное программное обеспечение для расчета и проектирования индукционных нагревателей широко использовалось и используется в ведущих организациях России: ВНИИТВЧ, ВНИИЭТО, ВИЛС, ОАО «Металлургический завод» г. Самара, ВСМПО и др. Оно также используется ведущими компаниями за рубежом: AJAX Magnethermic Corp., INDUCTOTHERM Inc., INDUCTOHEAT Corp., RADYNE Ltd. и т.д.

Результаты работы использованы при разработке индукционных нагревателей алюминиевых заготовок на ОАО «Металлургический завод» г. Самара, титановых на ВИЛСе и ВСМПО. Разработана и поставлена на Волжский трубный завод серия вертикальных и горизонтальных индукторов для нагрева трубных заготовок. Результаты работы использованы при внедрении установки подогрева стальных слябов на Geneva Steel (Provo, Utah, USA) мощностью 42 МВт и агрегата горячего цинкования производительностью 350 тысяч тон в год на Hertland Steel (Terre Haute, Indiana, USA).

Результаты работы используются как для научно-исследовательских целей, так и в учебном процессе при подготовке курса «Моделирование электротермических установок», «Теоретические основы индукционного нагрева», «Индукционный нагрев», «Проектирование электротермических установок» в СПбГЭТУ (ЛЭТИ), НГЭТУ (НЭТИ) и Интенсивных Курсов и семинаров проектов Европейского Сообщества по учебной программе TEMPUS T_JEP_10021-95 и CP_20021-98.

В 2001 году автор награжден медалью «Лауреат Всероссийского Выставочного Центра», 5 аспирантов под руководством автора подготовили и защитили кандидатские диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 140 печатных работ. Из них 1 монография, 4 учебника или учебного пособия, 2 патента США, 7 авторских свидетельств на изобретения, остальное - статьи, зарегистрированные программы, доклады.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 260 наименований. Основная часть работы изложена на 319 страницах и содержит 122 рисунка и 11 таблиц.

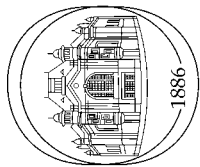
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткая характеристика современного состояния техники индукционного нагрева в металлургии, обосновывается актуальность исследований в диссертационной работе, формулируется цель и задачи работы, объясняется структура диссертационной работы, приводятся основные положения, выдвигаемые на защиту. Применение индукционных нагревателей в металлургической промышленности и соответствующая область объектов исследований в диссертационной работе иллюстрируется рисунком 1.

В первой главе излагаются теоретические вопросы разработки численных моделей индукционных нагревателей и их реализации в виде пакета прикладных программ.

Устройства индукционного нагрева (УИН) являются сложными техническими объектами, в которых протекают физические процессы различной природы. В общем случае математическое описание таких объектов представляет собой систему детерминированных нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений, записанных для многомерных и многосвязных областей. Если не вводить существенных упрощений в постановку задачи, то решение указанной системы уравнений, а значит и количественное описание изучаемых объектов может быть получено только с использованием численных методов через моделирование на ЭВМ. Применение ЭВМ при моделировании индукционных электротермических установок позволило существенно продвинуть вперед теорию индукционного нагрева. Это связано с тем, что появилась реальная возможность не только исследовать отдельные аспекты и закономерности проявления электромагнитных эффектов, но и создавать комплексные модели, учитывающие неразрывную связь электромагнитных и тепловых процессов в нелинейных и многомерных областях загрузки индукционных электротермических устройств. В известном смысле можно говорить, что уровень развития моделирования индукционных нагревателей определяет уровень развития их теории.

Поэтому в течение всего времени выполнения диссертационной работы автор постоянно уделял большое внимание разработке и совершенствованию



СПБГЭТУ (ЛЭТИ)

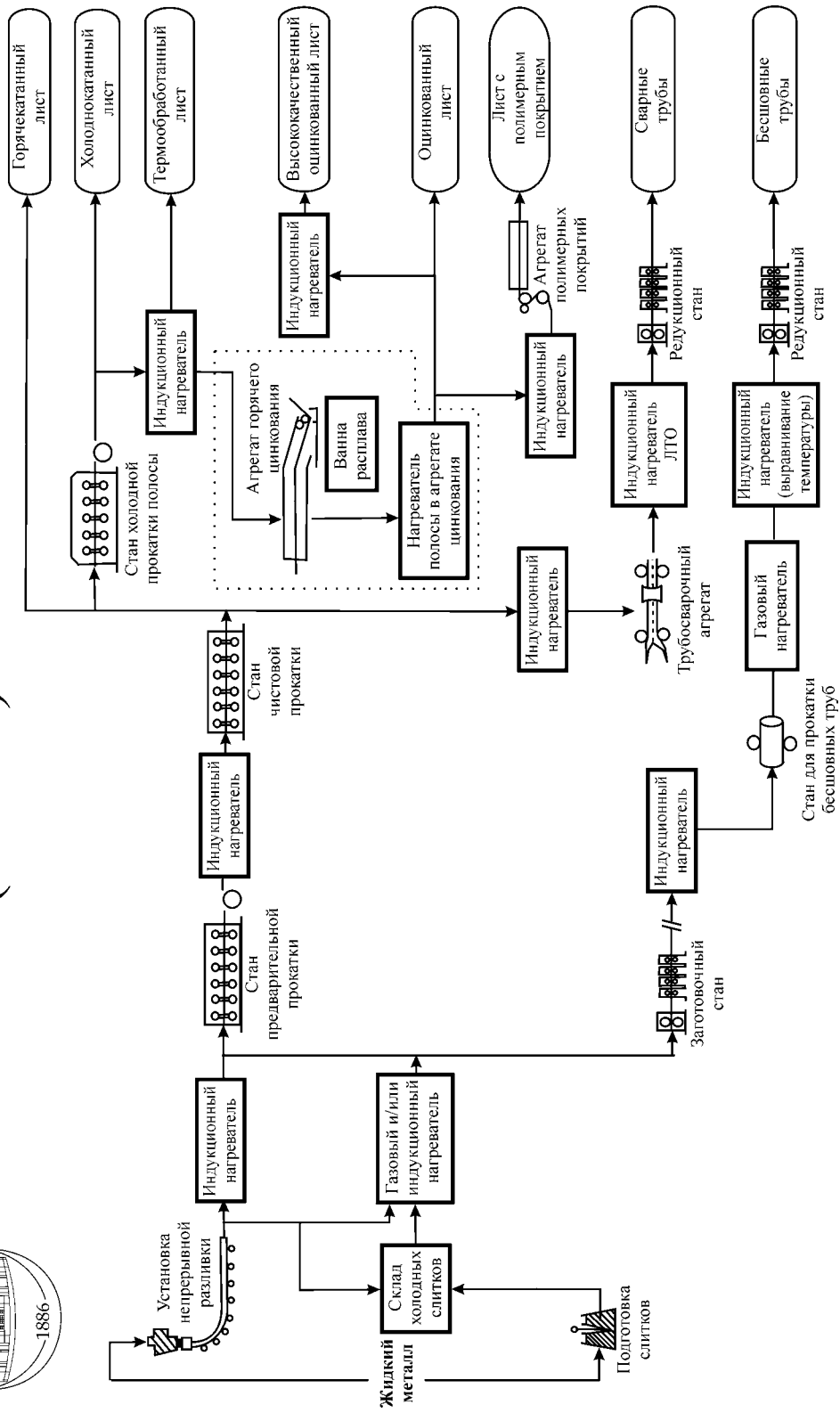


Рис. 1. Использование индукционного нагрева в металлургии

методов расчета и реализации их как при собственных исследованиях, так и как инструмент исследований в других организациях. Особое внимание уделялось использованию моделей в доступной форме в учебном процессе по курсам «Моделирование ЭТУ», «Теоретические основы индукционного нагрева», «Индукционный нагрев», «Проектирование ЭТУ».

Большой вклад в проведении работ по численному моделированию УИН, начиная с 70х годов, оказали сотрудники кафедры электротехнологической и преобразовательной техники Санкт-Петербургского электротехнического университета (ЛЭТИ): Немков В.С., Полеводов Б.С., Павлов Н.А., Буканин В.А., позднее Смирнов Н.Н., Никаноров А.Н., Чмиленко В.Ф., Позняк И.В., Зенков А.Е.; во ВНИИТВЧ: Гуревич С.Г., Карпенкова О.И., Александрова Т.Д., Алонсо А.А., Иохина И.И. В МЭИ это направление работ проводилось Кувалдиным А.В., Сальниковой И.П. За рубежом известна канадская школа (университет Торонто) моделирования индукционного нагрева, в Европе наиболее известны работы по численному моделированию УИН, проводимые в университетах Ганновера, Ахена, Ильменау (Германия), Падуанском университете (Италия) и ряде компаний.

Наибольшее распространение получили так называемые электротепловые модели, которые отражают наиболее существенные особенности индукционного нагрева - взаимное влияние электромагнитных и температурных полей. К середине 70-х годов были разработаны первые двумерные электротепловые модели для расчета индукционных нагревателей цилиндрических и плоских тел. Использование компьютерной техники того времени требовало высокой квалификации пользователя и значительных затрат времени на подготовку данных, проведение расчетов и верификацию результатов.

Существенно ситуация изменилась с появлением персональных компьютеров. Их доступность привела к разработке моделей с "дружественным" интерфейсом, которые позволяли бы пользователю, не знакомому с численными методами, на основе только физической постановки задачи легко вводить базовые исходные данные и анализировать результаты расчетов. Автор, используя модели, разработанные им в 1970х–1980х годах, проводил большую систематическую работу в этом направлении по усовершенствованию моделей. Результатом явился комплекс программ Induction Heating (IndHeat), который широко используется ведущими организациями, разрабатывающими индукционное оборудование.

В практику проектирования все чаще входит использование пространственно трехмерных моделей. Большинство коммерческих пакетов, разработанных такими корпорациями, как ANSYS, ANSOFT, INFOLITICA, Cedrat и др. ориентированы на широкую область применения в различных областях науки и техники и мало ориентированы для решения конкретных задач индукционного нагрева, учитывающих взаимное влияние электромагнитных и температурных полей и особенности протекания технологического процесса в устройствах индукционного нагрева. Поэтому проектировщик, как показывает опыт, испытывает трудности, связанные с использованием подобных пакетов. Тем не менее автор использует конечно-элементный пакет ANSYS для разовых расчетов с целью верификации собственных моделей или при решении некоторых трехмерных электромагнитных задач индукционного нагрева, когда затраты при

разработке и верификации собственной модели неоправданно велики. Однако при проектировании индукционных нагревателей предпочтительно использовать узкоспециализированную (направленную на применение в области индукционного нагрева) модель, отвечающую всем требованиям пользователя к интерфейсу, адекватности полученных результатов, минимальными временными затратами на освоение, постановку задачи и расчет.

Резкий рост производительности вычислительной техники сделал возможным использование в системах управления в реальном масштабе времени пространственно двухмерные моделей. Другая особенность работы связана с включением базовых моделей индукционных нагревателей в модели всей технологической линии или всего технологического процесса, например, в модель тепловых процессов линии непрерывной разливки – непрерывной прокатки или в модель тепловых процессов в линии горячего цинкования ленты.

Ведущее место при создании электротепловых моделей индукционных нагревателей занимает разработка метода электрического расчета. Это объясняется тем, что при индукционном нагреве металлов первичным и основным фактором, влияющим на формирование температурного поля заготовки, является распределение внутренних источников теплоты (индуцированных токов) по объему заготовки. Электрический расчет должен дать количественную картину распределения электромагнитного поля в объеме нагреваемого тела и, тем самым, создать необходимые предпосылки для решения тепловой задачи. С другой стороны, электрический расчет должен включать в себя определение интегральных параметров индукционной установки, характеризующих ее как потребителя энергии. Указанные задачи являются наиболее общими при моделировании любой индукционной нагревательной системы, и без их решения невозможен сколь либо точный анализ процесса нагрева. Конкретизация требований, которым должна удовлетворять математическая модель, связана с анализом особенностей исследуемой индукционной системы.

Все численные методы расчета электромагнитных полей в УИН можно отнести к двум различным постановкам задачи. Первая основана на описании электромагнитного поля дифференциальными уравнениями Максвелла с соответствующими граничными условиями. В ходе расчета учитывается взаимодействие только близлежащих микрообъемов. Такая постановка соответствует теории близкодействия, описывающей распространение электромагнитной волны от точки к точке, ее преломление и отражение на границах сред. На этом подходе основано применение методов конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ) для расчета электромагнитного поля.

Вторая постановка задачи основана на теории дальнего действия и заключается в том, что поле в любой точке определяется как сумма полей, создаваемых всеми источниками, первичными и вторичными. Первичными являются сторонние источники, вносимые в систему. Вторичные источники определяют поле реакции тел, составляющих систему, на поле первичных источников. При этом все тела заменяются распределенными в их объеме источниками, взаимодействие между которыми определяется в вакууме. Метод вторичных источников приводит к интегральным уравнениям и может быть назван также методом интегральных

уравнений (МИУ). Метод интегральных уравнений удобен для расчета квазистационарных систем, в которых можно пренебречь запаздыванием сигнала. Распределение электромагнитного поля в индукционной системе с немагнитной нагрузкой описывается интегральным уравнением Фредгольма второго рода. Был разработан и исследован эффективный метод решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода, получивший название метод полного осреднения ядра интегрального уравнения. Он был распространен на расчет индукционных систем с магнитопроводами, с магнитной нагрузкой и сложной внешней цепью включения индукторов. Обобщенная система уравнений в матричном виде для расчета индукционных систем с магнитно-немагнитной нагрузкой, магнитопроводом и сложной схемой питания индуктора (рис.2) может быть представлена:

$$\begin{pmatrix} a_{AA} & a_{AB} & a_{AN} & a_{AF} & 0 \\ a_{BA} & a_{BB} & a_{BN} & a_{BF} & a_{BC} \\ a_{NA} & a_{NB} & a_{NN} & a_{NF} & 0 \\ a_{FA} & a_{FB} & a_{FN} & a_{FF} & 0 \\ 0 & a_{CB} & 0 & 0 & a_{CC} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathcal{I}_A \\ \mathcal{I}_B \\ \mathcal{I}_N \\ \mathcal{I}_F \\ \mathcal{U}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathcal{U}_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Здесь индексом А обозначены элементы матрицы, связанные с немагнитной нагрузкой, В – с индукторами, F – с магнитопроводами, N – с импедансными элементами. Индексом С обозначены элементы матрицы уравнений связи, а a_{AA} , a_{BB} , a_{FF} , a_{NN} , a_{CC} - собственные матрицы массивов и элементов схем питания;

$$\begin{matrix} a_{BA} & a_{AB} & a_{AN} & a_{AF} \\ a_{NA} & a_{NB} & a_{BN} & a_{BF} \\ a_{FA} & a_{FB} & a_{FN} & a_{NF} \end{matrix}$$

взаимные матрицы массивов А, В, N, F

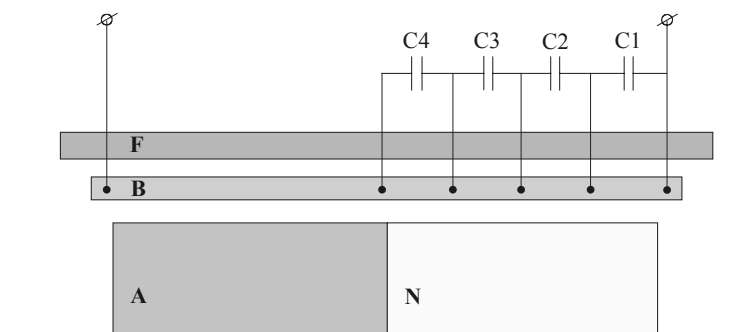


Рис.2. Эскиз индукционной системы с шунтирующими емкостями.

$\mathcal{I}_A, \mathcal{I}_B$ - комплексные векторы токов в элементах немагнитной нагрузки (массив А) и цепей индукторов (массив В), \mathcal{I}_N - комплексные векторы токов проводимости и намагниченности импедансных элементов (типа N), \mathcal{I}_F - комплексный вектор токов намагниченности магнитопровода, a_{CB}, a_{BC} - матрицы связи

элементов схемы питания и обмоток индуктора, \mathcal{U}_C - комплексный вектор напряжений на контурах.

Применение метода интегральных уравнений показало его высокую эффективность во многих приложениях индукционного нагрева. МИУ не требует

расчета электромагнитного поля вне проводящей среды и не требует задания краевых условий. Метод очень эффективен при сложном характере соединений индукторов и в случае сильно выраженного поверхностного эффекта в загрузке. Порядок системы алгебраических уравнений в этом случае относительно невелик и соответственно мало время счета. В качестве достоинства метода следует отметить возможность просто определять входные параметры индуктора: КПД, коэффициент мощности, активное и реактивное сопротивление индукторов. Однако в то же время и выявился ряд недостатков вычислительного характера. При относительно слабо выраженном поверхностном эффекте и сильной неоднородности загрузки требуется разбиение загрузки на большое число элементов дискретизации N .

Поскольку матрица системы алгебраических уравнений при использовании МИУ плотно заполненная, то время решения стремительно растет с увеличением порядка системы ($\sim N^3$), так же как и требуемая память ($\sim N^2$). Этот недостаток особенно проявляется при разработке электротепловых моделей, когда необходимо многократное решение электрической задачи и детальная дискретизация загрузки. МКР и МКЭ позволяют детально исследовать распределение электромагнитных и температурных полей в загрузке. Время счета при использовании этих методов решения и требуемый объем памяти обычно пропорциональны первой степени N элементов дискретизации. Краевые условия на поверхности загрузки чаще всего не известны и приходится пространственную сетку распространять на окружающую среду вплоть до границ, где допускается принять условия, связанные с затуханием поля при удалении от индукционной системы. Число узлов пространственной сетки становится во много раз больше, чем при решении только внутренней задачи. Определение входных и интегральных параметров системы и постпроцессорная обработка результатов требует дополнительных затрат времени, которые часто сравнимы с временем собственно расчета. Поэтому были предложены и разработаны так называемые экономичные методы, которые объединяют достоинства вышеупомянутых двух концепций расчета электромагнитного поля.

Применительно к осесимметричной индукционной системы выделим область A , связанную с загрузкой, где требуется детальное знание распределения электромагнитного поля для последующего расчета температурного поля, и область B , связанную с индуктирующими катушками и другими проводящими элементами конструкции (экранами, водоохлаждаемыми кольцами и т.д.). В данной системе распределение напряженности электрического поля \mathbf{E} описывается интегральным уравнением Фредгольма второго рода:

$$2\pi R_Q \mathbf{E}_Q + j\omega \int_S \sigma_Q \mathbf{E} M_{QP} dS_P = \varepsilon_Q \quad (2)$$

где M_{QP} - взаимная индуктивность нитей Q и P ;

$$\varepsilon_Q = \begin{cases} 0, Q \in A \\ \varepsilon_Q, Q \in B \end{cases} \quad \text{внешняя ЭДС, приложенная к элементу } Q$$

A - сечение загрузки; B - сечение индуктора и других проводящих элементов; S - сечение проводников, $S = A \cup B$.

Для выделенного в области A тонкого слоя L по периметру загрузки запишем уравнение (2) относительно напряженности электрического поля в области L и в индукторе, считая распределение напряженности электрического поля в остальной области известным:

$$2\pi R_Q \mathcal{E}_Q + j\omega \int_{S(B+L)} \sigma_Q \mathcal{E} M_{QP} dS_P = \varepsilon_Q - j\omega \int_{S(A-L)} \sigma_Q \mathcal{E} M_{QP} dS_P \quad (3)$$

Система уравнений, полученная при записи уравнения (3) для неизвестных в области $(B+L)$ и их алгебраизации, имеет невысокий порядок и просто решается. Таким образом, находится распределение напряженности электрического поля в области L , которое служит граничным условием для решения внутренней задачи, описываемой уравнением

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial R} - \frac{\mathcal{E}}{R^2} = j\omega \mu_0 \mu \sigma \mathcal{E} \quad (4)$$

Уравнение (3) решается поочередно с уравнением (4) до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность в определении напряженности электрического поля. Для решения уравнения (4) с граничными условиями первого рода использовались как МКР, так и МКЭ.

Комбинированный метод расчета оказался очень эффективным при расчете индукционного нагрева ленты в поперечном магнитном поле. Электромагнитные процессы в этой системе, состоящей из проводящей загрузки и индуктирующих проводников, описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{E} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}; \\ \bar{H}_P &= \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\bar{J} \times \bar{R}}{R^3} dV; \\ \bar{H} &= \bar{H}_B + \bar{H}_P; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\bar{E} = \rho \bar{J}$ – напряженность электрического поля; \bar{H}_B – напряженность магнитного поля возбуждения индуктирующих токов; \bar{H}_P – напряженность магнитного поля реакции наведенных в загрузке токов; \bar{J} – вектор плотности наведенных токов; \bar{R} – вектор, соединяющий точку источника поля с точкой наблюдения.

Совместное решение системы (5) в трехмерной постановке сопряжено с серьезными трудностями вычислительного характера. Однако при рассмотрении индукционных систем с поперечным магнитным полем обычно частота тока выбирается такой, чтобы глубина проникновения была больше, чем толщина ленты. В этом случае можно считать, что токи в ленте наводятся только нормальной к ее плоскости составляющей магнитного поля и токи имеют только две пространственные составляющие. Для решения (5) эффективен комбинированный метод, сущность которого заключается в последовательном решении внешней пространственно трехмерной при произвольном расположении индуктирующих проводов и внутренней двухмерной задач относительно нормальной к плоскости ленты составляющей напряженности магнитного поля.

Наибольший интерес при разработке индукционных нагревателей представляют электротепловые модели. Электромагнитные поля рассчитываются МИУ, МКР или МКЭ, или их комбинацией. Расчет температурных полей основан на решении уравнения теплопроводности при соответствующих начальных и граничных условиях.

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - C_v \frac{\partial T}{\partial t} + w = 0 \quad (6)$$

где C_v - объемная теплоемкость, T - температура; λ - коэффициент теплопроводности, w - объемная плотность внутренних источников теплоты.

Первые разработанные электротепловые модели содержали отдельные блоки электрического и теплового расчетов. При различных пространственных дискретизациях области или различных методах расчета для передачи массива внутренних источников теплоты из блока электрического расчета в блок теплового расчета необходим блок интерполяции. Структуру нагревателя и режим его работы определяет информационно-логический блок. Он же управляет вводом и выводом информации, а в случае необходимости оптимизации конструкции или режима работы индукционной системы содержит алгоритм оптимизации.

Связь электромагнитного поля в системе с температурным полем обусловлена зависимостью удельного сопротивления и магнитной проницаемости от температуры. Наиболее естественный алгоритм расчета электротепловых процессов в индукционных нагревательных устройствах при известном начальном распределении температур заключается в следующем:

1. Исходя из температурного поля загрузки находится удельное сопротивление и магнитная проницаемость каждого элемента дискретизации области загрузки.
2. Проводится расчет электромагнитного поля.
3. В интерполяционном блоке происходит формирование массива внутренних источников теплоты для решения тепловой задачи из массива, найденного после решения электрической задачи. Если элементы дискретизации в обеих задачах одинаковы, то массивы их внутренних источников теплоты совпадают.
4. Находится температурное поле на следующем временном слое, определяемом шагом по времени τ .
5. Если критерии окончания процесса нагрева не удовлетворены, то происходит переход к п.1.

Выбор шага по времени определяется требуемой точностью расчета. В то же время при фиксированном τ точность определения температурного поля зависит от свойств схемы решения и от того, насколько сильно изменились внутренние источники теплоты за время. Если источники меняются слабо, то на выбор шага по времени влияние оказывает только первый фактор.

В этом случае пересчет электрической задачи, т.е. коррекция внутренних источников теплоты, может оказаться целесообразным через несколько шагов по времени. Такой подход оказался эффективным при расчете нагрева заготовок из алюминия и его сплавов. Требуемая точность расчета конечного температурного

поля достигалась всего лишь при 3 - 4 пересчетах электрической задачи. С другой стороны, при сильной нелинейности электрофизических свойств шаг по времени определяется главным образом вторым фактором. Это характерно, например, для расчета нагрева ферромагнитной стали в "холодной" и "промежуточной" стадии. Трудности усугубляются еще тем, что на различных стадиях нагрева изменение источников за один и тот же интервал времени сильно различается. Повысить точность расчета можно, организовав итерационный процесс на каждом временном шаге с коррекцией внутренних источников теплоты. Особенно удобно это осуществить, если используются одинаковые методы расчета электромагнитного и температурного полей. При одинаковой пространственной дискретизации области расчет электромагнитного и температурного полей на каждом временном шаге может быть реализован в компактной форме в одном блоке.

Разработаны, теоретически обоснованы и экспериментально проверены численные модели совместного расчета электромагнитных и температурных полей в индукционных нагревателях для металлургической промышленности, образующих иерархическую структуру из пространственно одно-, двух- и трехмерных моделей.

Таблица.

	1D		2D		3D	
	1	2	1	2	1	2
Цилиндрические тела	+	+	+	+	-	
	CP1D		Universal2D			
Слябы, блюмсы	+	+	+	+	+	-
	CP1D		SS2D		Universal3D	
Лента	+	+	+	+	-	
	CP1D		SS2D			

1 - гармоническое ЭМ поле; 2 - ЭМ поле во временной области

В таблице сведены базовые модели, входящие в пакет Induction Heating (IndHeat). Все они позволяют моделировать электромагнитные и температурные поля в нагревателях периодического действия, непрерывных нагревателях, непрерывных с дискретным и с возвратно-поступательным движением загрузки:

- CP1D – пространственно одномерная модель для расчетов индукционного нагрева цилиндрической загрузки, слябов, пластин, лент.

- SS2D – пространственно двухмерная модель для расчетов индукционного нагрева слябов, пластин, лент.

- Universal2D – пространственно двухмерная модель для расчета индукционного нагрева цилиндрических тел.

- Universal3D – пространственно трехмерная модель для расчета индукционного нагрева слябов, блюмсов.

Вторая глава диссертационной работы посвящена оптимизации управления и проектирования индукционных нагревателей для металлургической промышленности на основе численных моделей. При этом предполагается наличие формализованных критериев оптимизации и математических моделей проектируемых устройств. Наиболее общим критерием оптимизации является технико-экономический критерий эффективности функционирования всей проектируемой системы. Обобщенный критерий в большинстве случаев включает в себя ряд частных критериев, поэтому задача оптимального проектирования является задачей многокритериальной оптимизации. Частные критерии обычно отражают процессы различной физической природы, протекающие в системе, и являются несоизмеримыми. Поэтому разработка формализованного обобщенного критерия и соответствующей обобщенной модели является чрезвычайно сложной задачей и требует объединения усилий различных специалистов. На этой стадии эффективно использовать интерактивный режим работы путем диалогового взаимодействия человека с ЭВМ. Важно среди частных критериев выделить наиболее существенные. В этом случае можно, проводя последовательно по степени их значимости оптимизацию и используя, например, метод последовательных уступок, найти значения параметров проектируемой системы, которые удовлетворяли бы всем частным критериям. Другой подход позволяет значительно упростить решение задачи. Он заключается в том, что выбирается единственный превалирующий критерий, по которому производится оптимизация, а остальные конкурирующие показатели превращаются в ограничения: $K_i \leq |K_i|$, где $|K_i|$ – заданное наихудшее значение критерия K_i . Критериями оптимизации могут служить: показатели качества формирования температурного поля загрузки, полные затраты энергии на нагрев, производительность и т.д. При оптимизации конструкции и режимов работы УИН важно выделить только те параметры, которые существенно влияют на функцию качества. От выбора метода оптимизации, согласованного с точностью расчета критерия оптимизации, сильно зависят надежность и эффективность нахождения оптимального варианта конструкции и режима УИН. Для успешного решения указанных задач требуется разработка эффективных численных методов, обеспечение диалогового общения пользователя с ЭВМ, автоматизация рутинных операций, максимальное использование интеллектуальных возможностей исследователей и их опыта.

Известные методы решения задач оптимального управления индукционным нагревом основываются на упрощенных моделях процесса нагрева, учитывающих часто перепады температур только по одной координате (работы Рапопорта Э. Я, Павлова Н. А., Коломейцевой М. Б. и др.). В работе показано, что при индукционном нагреве в металлургическом производстве требуемая точность достижения конечного температурного поля ε сравнима с температурными перепадами по аксиальной координате, возникающими в реальных условиях нагрева. Это заставляет решать задачу оптимального управления двумерным температурным полем. В качестве управляющего воздействия принималось напряжение на индукторе $U(t)$, на которое на всем времени протекания процесса $0 < t < t_0$ накладывалось ограничение вида:

$$0 \leq U(t) \leq U_{\max} \quad (7)$$

Также учитывались фазовые ограничения на максимальную температуру в объеме слитка в течение всего процесса

$$T_{\max}(\bar{x}, t) \leq T_{ogr}, t \in [0, t_0] \quad (8)$$

и ограничения на градиент температурного поля.

В работе для индукционного нагревателя периодического типа решалась задача быстрогодействия, т. е. требовалось найти управление $U_{opt}(t)$, обеспечивающее нагрев заготовки до заданной конечной температуры T_k с заданной абсолютной погрешностью ε по всему его объему в минимальное возможное время $t=t_{\min}$ при условиях (7) и (8).

Для решения этой задачи применялся альтернативный метод, предложенный Э. Я. Рапопортом и строго обоснованный для одномерного описания процесса индукционного нагрева, и который был распространен в работе на случай двумерного описания нагрева цилиндрического слитка. Показано, что и в этом случае число интервалов оптимальной релейной программы при заданной точности ε определяется индексом ближайшего к ε члена ряда неравенств $\varepsilon_{\min}^{(i-1)} > \varepsilon > \varepsilon_{\min}^{(i)}$, т. е. число интервалов постоянства $U_{opt}(t)$ равно i . При известном числе интервалов; нахождение длительностей $\Delta_m, m = 1, 2, \dots, i$, сводится к вычислению их длительностей для оптимальной программы управления. Необходимые соотношения для расчета величин интервалов получаются из установленных свойств температурного поля в конце оптимального процесса. В работе найдены основные соотношения, которые фиксируют предельный уровень отклонения температуры в граничных точках от требуемой конечной при двухинтервальном управлении с учетом и без учета фиксированного времени транспортировки слитка от нагревателя к деформирующему оборудованию. Решение полученных систем уравнений позволяет найти оптимальную программу управления, а в случае $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(i)}$, то и величину максимально достижимой однородности температурного поля загрузки в данной индукционной системе. Из-за отсутствия аналитического описания двумерного температурного поля от параметров программы управления, удобно свести отыскание последних к поиску в пространстве их длительностей экстремума некоторого функционала, глобальный минимум которого, равный нулю, достигается на искомом решении.

Разработана программа для решения задачи оптимального управления двумерным температурным полем при индукционном нагреве цилиндрических заготовок. В ней реализован предложенный в работе итерационный способ минимизации функционалов, основанный на аналитической аппроксимации функционала на каждой итерации и уточнении аппроксимирующего выражения по мере продвижения к минимуму. Итерационный алгоритм обладает высокой скоростью сходимости и по сравнению с известными методами поиска минимума, позволяет резко сократить время решения задачи на ЭВМ. В работе исследована

зависимость параметров программы оптимального управления и максимально достижимой однородности температурного поля загрузки от величины заглублиения слитка в индукторе. Показано, что при заглублиении, обеспечивающем максимально достижимую однородность температурного поля загрузки, время оптимального процесса минимально.

В работе найдена система соотношений, решение которой позволяет одновременно определить параметры оптимальной программы управления и оптимальную величину заглублиения слитка в индукторе, и разработан алгоритм совместного решения задачи оптимального управления и проектирования ИН периодического действия.

В работе также решена задача оптимизации конструктивных параметров ИН непрерывного действия с дискретным переталкиванием слитков с целью достижения наилучшего приближения температурного поля слитка к требуемому при градиентном и равномерном нагреве. Ставилась задача определения поисковыми методами числа витков индуктора (W), величин заглублиения слитков на входе (σ_n) и на выходе (σ_k) из индукционной печи, обеспечивающих максимальное приближение температурного поля к требуемому, при заданной производительности и известном числе слитков в нагревателе. В терминах математического программирования задача может быть сформулирована:

$$\text{найти } \min F(x), \quad x \in E^n$$

где $x = \{\sigma_n, \sigma_k, W_u\}$ – вектор оптимизируемых параметров; E^n – n -мерное евклидово пространство; $F(x)$ – функция качества, оценивающая отклонение температурного поля по длине заготовки $T(z)$ от требуемого $T^*(z)$.

Для решения поставленной задачи необходимо определить математическое выражение для функции качества, которое позволило бы дать количественную меру отклонения температурного поля от требуемого. В общем случае оценить отклонение температурного поля по длине загрузки можно с помощью выражения

$$F_s = \left(\frac{1}{l_2} \int_0^{l_2} |T(z) - T^*(z)|^s dz \right)^{1/s} \quad (9)$$

Каждому значению s соответствует свое выражение функции качества. Для конкретности будем рассматривать выражение (9) при двух значениях s : $s=2$ и $s \rightarrow \infty$. В первом случае функция качества имеет вид:

$$F_2 = \sqrt{\frac{1}{l_2} \int_0^{l_2} |T(z) - T^*(z)|^2 dz} \quad (10)$$

и ее можно интерпретировать как среднеквадратическое отклонение распределения температуры $T(z)$ от требуемого $T^*(z)$.

При $s \rightarrow \infty$ получим

$$F_\infty = \max_{l_2} |T(z) - T^*(z)|. \quad (11)$$

В этом случае мерой отклонения температуры является максимальная по длине заготовки l_2 разница между требуемым и полученным распределением температуры.

Анализ показал, что обе функции качества имеют один минимум, который достигается при близких значениях оптимизируемых параметров: По ряду причин вычислительного характера оптимизацию целесообразно проводить по критерию (10) с одновременным контролем максимального отклонения распределения температурного поля от требуемого. Задача обеспечения наилучшего приближения температурного поля при разработке универсальных установок для нагрева слитков с различными законами распределения температуры по длине, равно как для нагрева слитков различной длины может быть сформулирована в виде задачи нелинейного программирования с ограничением на длину индуктора. Для ее решения удобно использовать метод штрафной функций. При этом задача сводится к минимизации объединенной функции качества, имеющий вид:

$$F_{ob} = \sqrt{\frac{1}{l_2} \sum_{i=1}^{N_i} (T_i - T_i^*)^2} \Delta z_i + \mu(\sigma_n + \sigma_k + Nl_2 - l_1)^2 \quad (12)$$

где N — число слитков, l_2 — их длина, l_1 — длина индуктора, μ — весовой коэффициент.

В третьей главе с использованием численных моделей исследуются и разрабатываются индукционные нагреватели цилиндрических тел. Ряд исследуемых эффектов обобщается в виде графических зависимостей от безразмерных параметров.

Происходящие при индукционном нагреве электромагнитные явления удобно характеризовать с помощью краевых эффектов индуктора и нагрузки, под которыми понимается влияние их конечных размеров на распределение электромагнитного поля в системе индуктор — нагрузка. Разработанные численные модели расчета распределения электромагнитного поля были использованы для исследования и обобщения краевых эффектов индуктора и загрузки. Распределение мощности по длине нагреваемой заготовки определяется размерами индукционной системы и степенью поверхностного эффекта в загрузке. В большинстве индукционных устройств краевые эффекты индуктора и нагрузки накладываются друг на друга, а при малой длине нагреваемого изделия или обмотки индуктора происходит также наложение искажений, обусловленных обоими концами элементов системы. В чистом виде краевой эффект индуктора часто проявляется при непрерывно-последовательном или локальном периодическом нагреве весьма длинных изделий, а краевой эффект загрузки при помещении ее в однородное продольное магнитное поле.

Введен ряд безразмерных коэффициентов, который позволяет характеризовать распределение мощности по длине цилиндров в зависимости от степени выраженности поверхностного эффекта в загрузке, относительной величины заглубления загрузки в индукторе и соотношения радиуса индуктора к наружному радиусу загрузки.

Краевые эффекты загрузки сильно влияют на формирование температурного поля и в конечном счете на качество нагрева заготовок. Получены обобщенные

данные о предельно достижимой точности нагрева цилиндрических тел в зависимости от конструкции и режима работы индукторов. Обобщены характеристики температурных полей при индукционном нагреве цилиндрических немагнитных тел при различном распределении мощности по длине.

Проанализирована динамика изменения как распределенных, так и интегральных параметров индукционных нагревателей периодического действия стальных заготовок. В силу особенностей проявления краевого эффекта цилиндра в ферромагнитном и немагнитном состоянии при индукционном нагреве стали типично заниженное выделение мощности в торцевой части заготовки в "холодном" состоянии. Для заготовки, потерявшей магнитные свойства, наоборот для компенсации дополнительных тепловых потерь с торца характерно завышенное выделение мощности в торцевой части по сравнению со средней.

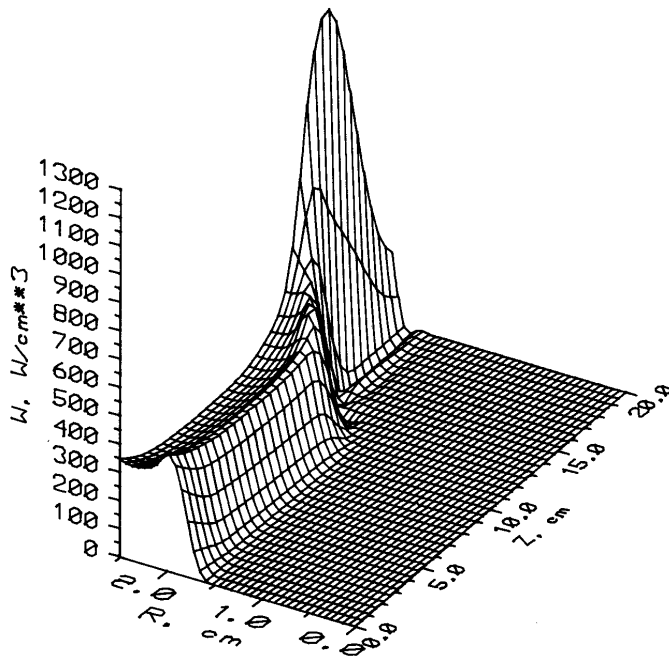


Рис.3. Распределение удельной объемной мощности в цилиндре.

Для этого рассматривался нагрев стального цилиндра диаметром 5 см и длиной 20 см в индукторе той же длины и диаметром 8 см, смещенного относительно загрузки на 5 см. Частота тока 2400 Гц. Через 21 секунду после начала нагрева появляется зона с температурой выше точки Кюри. На части цилиндра длиной 12 см, отсчитывая с левого торца слитка, образуется двухслойная среда. Это обуславливает резкое перераспределение источников теплоты в этой области (рис.3). Максимум выделения удельной объемной мощности в этой области приходится на границу немагнитной и ферромагнитной зон.

В современных установках индукционного нагрева в качестве источника питания используются полупроводниковые преобразователи частоты. Разработана математическая модель совместной работы тиристорного преобразователя с индукционным нагревателем непрерывного действия стальных заготовок в неуставившемся режиме. Исследован диапазон изменения параметров

Анализ динамики изменения источников теплоты в процессе нагрева показывает сложный, нетривиальный ход их распределения в процессе нагрева. В силу большого числа факторов, влияющих на распределение внутренних источников теплоты в двумерной области, получить какие-то результаты в обобщенном виде не представляется возможным. Поэтому исследования проводились для случая, когда проявляются различные аспекты краевых эффектов индуктора и загрузки и температурное поле по длине загрузки резко неравномерное.

индукторов и температурных полей в переходных режимах нагрева стальных труб. Исследованы режимы пуска индукционных нагревателей с дискретным перемещением заготовок с учетом изменения параметров в системе "тиристорный преобразователь частоты - индукционный нагреватель".

На энергетические характеристики индукционного нагревателя сильное влияние оказывает выбор футеровки. Проведена оптимизация толщины футеровок индукционных нагревателей стальных заготовок по критерию полного максимального КПД индукционного нагревателя.

Существенная часть индукционных нагревателей в металлургической промышленности работает на частоте 50/60 Гц. Исследованы и разработаны индукционные нагреватели цилиндрических тел с трехфазным и автотрансформаторным включением индукторов, с многослойными обмотками индукторов периодического и непрерывного действия, включая нагреватели трубных заготовок. Исследованы различные средства пространственного управления распределением электромагнитного и температурного полей по длине загрузки.

Исследованы особенности индукционного нагрева крупногабаритных титановых заготовок. Применение пониженной частоты (13,6 Гц) при индукционном нагреве крупногабаритных титановых заготовок по сравнению с промышленной частотой позволяет сократить время нагрева на 35-45%. Применение улучшенной футеровки позволяет сократить энергозатраты на 30%. Тепловые потери с поверхности заготовок оказывают решающее влияние на температурное поле заготовок. Применение пониженной частоты при прочих равных условиях снижает температурные кондиции заготовок. На пониженной частоте больше вероятность аварийного режима плавления внутренних слоев металла. Определены условия, исключаящие возникновения подобного режима при высокотемпературном индукционном нагреве металлов с низкой теплопроводностью.

В четвертой главе исследуются и разрабатываются индукционные нагреватели плоских тел перед прокаткой. Проблему нагрева (подогрева) слябов можно разделить на две части. Нагрев из холодного состояния (или подогрев) «толстых» слябов с толщиной обычно 200-300 мм, и подогрев на участке промежуточного рольганга между черновыми и чистовыми клетями прокатного стана «тонких» слябов (полосы подката) с толщиной обычно 20-50 мм. Индукционный нагрев используется для формирования требуемого температурного поля сляба перед чистовой прокаткой.

В промышленности для нагрева слябов используются разнообразные типы индукционных печей. Наибольшее распространение получили овальные индукторы с продольным магнитным полем. Проанализированы три типа установок для нагрева толстых стальных слябов перед прокаткой.

1. Нагреватели периодического действия с вертикальным размещением овальных индукторов, которые охватывают сляб, стоящий на узкой грани.

2. Нагреватели непрерывного действия, состоящие из линии горизонтально расположенных овальных индукторов.

3. Нагреватели непрерывного действия, состоящие из линии горизонтально расположенных овальных индукторов с возвратно-поступательным движением слябов.

Каждая из конструкций нагревателя обладает своими достоинствами и недостатками и в каждом конкретном случае выбор зависит от многих факторов. Проведенный анализ этих конструкций показал, что установка с возвратно-поступательным движением загрузки более универсальна и может использоваться, как для нагрева, так и для подогрева слябов различной длины и ширины и эта концепция была использована при разработке и внедрении с участием автора индукционной установки мощностью 42 МВт для Geneva Steel (Utah, USA).

Для исследования и проектирования подобных установок был разработан ряд моделей, в том числе для анализа трехмерных электромагнитных и температурных полей в слябах с прямоугольным поперечным сечением и со скругленными углами. Модель позволяет рассчитывать трехмерные электромагнитные и температурные поля при индукционном нагреве слябов в периодическом и непрерывном режиме, в том числе при возвратно-поступательном движении сляба и термостатировании. Разработана комплексная модель тепловых процессов в линии «непрерывная разливка – непрерывная прокатка».

В работе исследован продольный и поперечный краевой эффект при нагреве тел с прямоугольным сечением. Введены специальные коэффициенты, позволяющие оценить индукционный нагрев в большом и обоснованно выбирать частоту тока, чтобы избежать перегрева или недогрева узких граней сляба.

Использование продольного и поперечного краевого эффекта позволило предложить специальную схему нагрева алюминиевых слябов на промышленной частоте, обеспечивающую хорошую равномерность температурного поля сляба при высоких энергетических характеристиках индукторов и высокой производительности.

Исследовано явление неравномерного температурного поля по длине сляба при возвратно-поступательном движении слябов в индукционном нагревателе. Показано, что даже два прохода за цикл достаточно для получения приемлемого температурного поля по длине сляба. Дана оценка чувствительности температурной неравномерности по длине сляба от точности выдержки шага прохода сляба.

Подогрев тонких слябов с толщиной 20-50 мм имеет существенные особенности, по сравнению с нагревом толстых слябов. Если для толстых слябов не вызывает сомнения выбор овального типа индукторов, то для тонких слябов конструкции индукторов значительно разнообразнее, что связано с более широкими задачами нагрева тонких слябов.

Необходимость подогрева стальной полосы на промежуточном рольганге между черновыми и чистовыми клетями стана горячей прокатки связана с общими требованиями повышения качества проката и снижения энергозатрат при прокатке.

Для этой цели могут быть использованы различные нагревательные установки. Индукционный способ нагрева наиболее подходит как для одновременного повышения общего уровня температуры ΔT , так и для подогрева

кромки и выравнивания температуры по ширине ΔT_{edge} , и компенсации температурного градиента по длине полосы ΔT_{length} и обеспечения стабилизации температуры на входе в чистовую клеть.

Подъем общего уровня температуры полосы ΔT перед входом в чистовые клетки прокатного стана обычно осуществляются в овальных неразъемных индукторах с продольным магнитным полем. Для подогрева кромок используются или щелевые индукторы (концепция, используемая Ajax Magnethermic) или С-образные индукторы (концепция, используемая японскими и европейскими компаниями). На основе анализа и исследования известных конструкций в работе были предложены две новые конструкции индукторов, которые объединяют достоинства рассмотренных конструкций и лишены их недостатков.

В пятой главе проведено исследование и разработка индукционных нагревателей для термообработки ленты и нанесения антикоррозионных покрытий методом горячего цинкования.

Первые исследования и публикации о промышленном применении индукционного нагрева стальной ленты появились в 40-е годы XX века. Однако широкое использование индукционного нагрева ленты в промышленности началось только в 60-х годах. Несмотря на высокую цену электрической энергии, индукционные печи составили сильную конкуренцию газопламенным печам для нагрева ленты. Высокий электрический КПД, отсутствие тепловой инерции, малые габариты, гибкость управления, легкость компоновки в производственные линии – все это благоприятствовало широкому использованию индукционных установок для нагрева стальной ленты.

В основном при индукционном нагреве ленты используются два метода: нагрев в продольном и нагрев в поперечном магнитном поле. При нагреве в продольном поле катушки индуктора располагаются так, чтобы токи индукторов возбуждали основной магнитный поток в направлении движения ленты. При использовании для нагрева поперечного магнитного поля расположение катушек должно быть таким, чтобы их токи генерировали магнитный поток, проходящий через поверхность металла в направлении перпендикулярном движению ленты.

При нагреве в продольном магнитном поле наводятся вихревые токи, циркулирующие по толщине ленты. Приемлемый КПД в этом случае может быть достигнут, если толщина ленты превышает две глубины проникновения электромагнитной волны в металл. При нагреве в поперечном поле предпочтительнее иметь глубину проникновения больше, чем толщина ленты. Наведенные в ленте токи протекают в плоскости ленты, а это значит, что для нагрева ленты той же толщины можно использовать меньшую частоту и, следовательно, более дешевый источник питания.

Электрический КПД индуктора при нагреве стальной ленты в продольном магнитном поле зависит от частоты, толщины ленты, удельной мощности и температуры ленты на входе и выходе из индуктора. Тепловой КПД не так сильно зависит от этих параметров, как электрический, но их влияние должно быть учтено при его расчете. В дальнейшем анализе используется понятие полного КПД

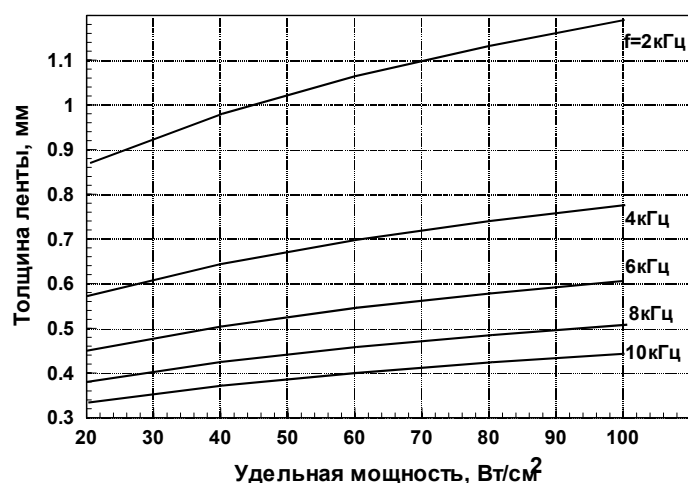
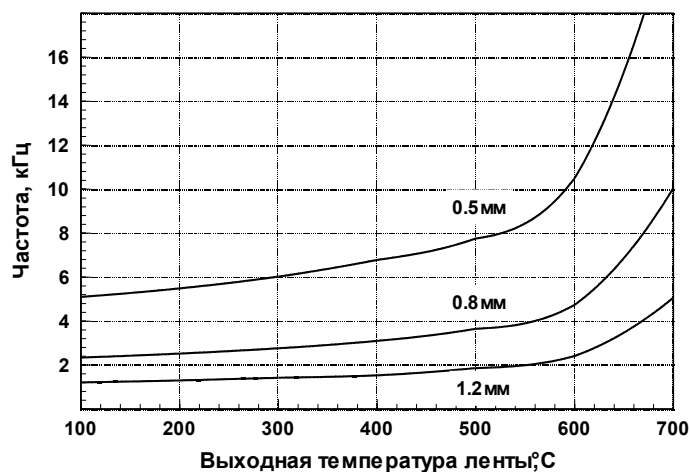


Рис. 4. К определению минимальной частоты для достижения КПД 90%. Начальная температура ленты 20°C. *a* - Удельная поверхностная мощность 40 Вт/см²; *b* - Температура ленты на выходе 300°C

Нагрев стальной ленты в поперечном магнитном поле имеет ограниченное применение. Нагрев в поперечном поле может быть применен, главным образом, для углеродистой ленты при температурах выше точки Кюри или для немагнитных сталей. Выбор частоты для индукционного нагрева в поперечном магнитном поле более сложен, чем для установок с продольным полем. Сложность возрастает оттого, что частота здесь зависит не только от свойств материала и толщины ленты, но также и от конструкции индуктора. Разработан ряд моделей, который позволяет оптимизировать конструкцию индукторов для нагрева в поперечном

индуктора, определяемого как произведение электрического и теплового КПД. И одним из главных проектных критериев индуктора при нагреве стальной ферромагнитной ленты является достижение полного КПД не менее 90%.

Для получения более высокой температуры ленты на выходе из индуктора необходимо использовать более высокие частоты (рис. 4, *a*). Необходимость увеличения частоты для увеличения выходной температуры ленты особенно значительна, если выходная температура близка к точке Кюри (725 – 750 °C). Частота должна быть резко увеличена для всех толщин при достижении температуры ленты выше 600 °C. При низких температурах нагрева требуются и более низкие частоты.

Удельная мощность тоже влияет на выбор частоты (рис. 2, *b*). С уменьшением удельной мощности при низких температурах нагрева ленты (ниже 300 °C), значение выбранной частоты снижается.

магнитном поле по энергетическим характеристикам и обеспечению приемлемого распределения температуры по ширине ленты.

В последнее время для отжига ленты и горячего цинкования все больше используются прогрессивные непрерывные технологии с размоткой рулонов перед отжигом.

В зависимости от выполняемого цикла нагрева, температура термообработки низкоуглеродистой стали в линии гальванизации может быть выше или ниже температуры точки Кюри. Использование двух различных типов индукторов (индуктора с продольным магнитным полем при температурах ниже точки Кюри и индуктора с поперечным полем при температурах выше точки Кюри) неудобно и дорого. Вместо этого может быть предложен другой подход. Конструкция индуктора в этом случае базируется на общей конструкции индуктора с

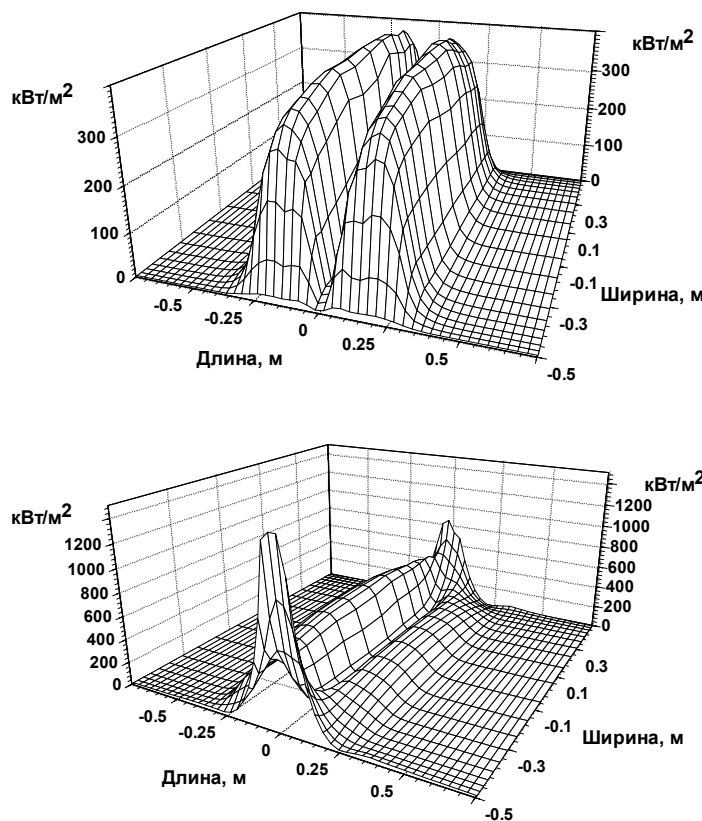


Рис. 5. Распределение источников теплоты в ленте: *a* - угол фазового сдвига 180° ; *b* - угол фазового сдвига 120°

(сдвиг фаз 180° , лента ферромагнитная). На рис. 5, *b* катушки работают в смешанном режиме, когда фазовый угол между токами равен 120° (левая сторона ленты ферромагнитная, а правая сторона имеет температуру выше температуры точки Кюри).

Смена сортамента ленты при непрерывном производстве приводит к частому изменению режима работы линии. На всех современных непрерывных линиях

поперечным магнитным полем. Верхняя и нижняя катушки индуктора так соединены с источником мощности, чтобы имелась возможность менять фазовый угол между их токами. Фазовый угол равен нулю, если необходим поперечный магнитный поток и 180° , когда необходим продольный поток. Смешанный магнитный поток для нагрева может быть получен, если угол фазового сдвига токов находится в диапазоне $0^\circ - 180^\circ$. Если источник мощности не позволяет плавно изменять углы фаз токов в индукционных катушках, то это можно выполнить переключением с фазы 180° на нуль, т.е. с продольного магнитного потока на поперечный в той же самой индукционной системе.

Распределение мощности в ленте показано на рис. 5, *a*, когда катушки работают в режиме продольного магнитного потока

горячего цинкования это может приводить к потере качества до 10-15% ленты. Применение индукционного нагрева в линиях горячего цинкования существенно улучшает ситуацию, за счет существенного снижения брака, увеличения производительности на той же площади, повышения рентабельности линии.

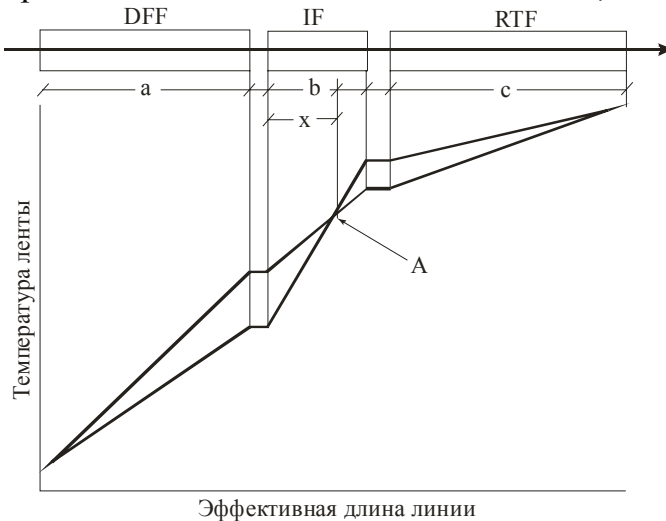


Рис. 6. Особая точка А в линии с индукторами.

При длине линий, достигающей нескольких сотен метров, при большой инерционности газовых печей и нежелательности частого изменения режима их работы при изменении толщины ленты она будет перегреваться или наоборот не достигать нужной температуры, пока не изменится скорость её движения и тепловой режим перейдет в стационар. В переходный период температура на значительных участках по длине ленты не удовлетворяет необходимым условиям, что и

является причиной брака.

Введение в линию индукционных нагревателей, создает наряду с изменением скорости, дополнительный канал управления. Практически безинерционность индукционных нагревателей позволяет получать необходимую температуру на выходе из радиационной печи при смене ленты или температурного цикла.

Другой особенностью этих переходных процессов является то, что температурные кривые нагрева лент с различной толщиной пересекаются в одной точке – точке А (рис. 6). Расположение этой точки и уровень температуры в ней для каждого цикла не меняется при различных толщине ленты и скорости линии. Эти данные получены с помощью нелинейной модели расчета температурных режимов нагрева ленты. В линейном случае и при допущении равномерности температуры по ширине ленты температуру T_s в точке А и ее положение x внутри индуктора (рис.6) можно определить по простым формулам:

$$T_s = T_0 + \frac{T_f - T_0}{\left[1 + \left(\frac{c}{a} \right) \times \left(\frac{p_a}{p_c} \right) \right]}, \quad (14)$$

$$x = \frac{b}{\left[1 + \left(\frac{c}{a} \right) \times \left(\frac{p_a}{p_c} \right) \right]}, \quad (15)$$

где: T_0 – температура ленты на входе, T_f - выходная температура ленты, а – активная длина печи прямого пламенного нагрева (DFF), b- активная длина

индукторов, s – активная длина печи радиационного нагрева (RTF), p_a – средняя удельная мощность нагрева DFF, p_c – средняя удельная мощность нагрева RTF.

Система управления по контролю температуры в одной точке может применяться для оптимизации тепловых переходных процессов. Каскадный управляющий контур последовательно изменяет мощность индукционных нагревателей и скорость движения ленты в линии для получения необходимой температуры в точке А. Эта система особенно эффективна при работе линии без изменения цикла обработки и при частой смене размеров ленты.

Результаты этих исследований использованы при проектировании и пуске линии горячего цинкования производительностью 350 тыс. тонн в год на заводе Heartland Steel в Terre Haute (USA).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена теоретическому обобщению и решению крупной научно-технической проблемы в области электротехнологии, заключающейся по совокупности результатов в развитии теории и разработке индукционных нагревателей для металлургической промышленности с использованием численных методов расчета и оптимизации. Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Дана классификация индукционных нагревателей для металлургической промышленности, на основе технико-экономического анализа определены приоритетные направления исследований и разработки электромагнитных систем индукционного нагрева для формирования требуемых температурных полей в линиях термообработки слябов, блюмсов, цилиндрических слитков, труб, лент.

2. В работе выдвигается и обосновывается экономичный подход к численному расчету 2х и 3хмерных электромагнитных полей в индукционных нагревательных системах. Этот подход заключается в комбинации методов интегральных уравнений для решения внешней задачи (область проводящих элементов, включающая индукторы со сложной схемой включения обмоток, конденсаторы, дроссели и элементы эквивалентной схемы источника питания) и методов конечных элементов и конечных разностей для решения внутренней задачи (область загрузки, где требуется детальный расчет распределения электромагнитного поля для последующего решения тепловой задачи).

3. Разработаны, теоретически обоснованы и экспериментально проверены численные модели совместного расчета электромагнитных и температурных полей в индукционных нагревателях для металлургической промышленности, образующих иерархическую структуру из пространственно одно-, двух- и трехмерных моделей.

4. Исследован и теоретически обобщен в виде нормированных графических зависимостей продольный краевой эффект цилиндрических заготовок и индукторов, продольный и поперечный краевой эффект для плоских тел при индукционном нагреве.

5. Разработаны методы и алгоритмы оптимального управления и проектирования индукционных нагревателей на базе численных двухмерных электротепловых моделей. Решена задача оптимального проектирования индукционных нагревателей массивных тел с учетом последующего оптимального управления по критериям наилучшего приближения температурного поля к заданному и быстродействию.

6. Получены обобщенные данные о предельно достижимой точности нагрева цилиндрических тел в зависимости от конструкции и режима работы индукторов.

7. Исследованы и разработаны индукционные нагреватели цилиндрических тел с трехфазным и автотрансформаторным включением индукторов, с многослойными обмотками индукторов периодического и непрерывного действия, включая нагреватели трубных заготовок. Разработаны и внедрены индукционные нагреватели вертикального и горизонтального исполнения мощностью до 2200 кВт

8. Исследованы и разработаны индукционные нагреватели слябов и полосы подката в линии с прокатным станом, включая индукционные нагреватели кромок полосы подката. Разработана комплексная модель тепловых процессов в линии «непрерывная разливка – непрерывная прокатка». Результаты работы использованы при внедрении установки подогрева стальных слябов на Geneva Steel (Provo, Utah, USA) мощностью 42 МВт.

9. Исследована и разработана новая концепция универсальных индукторов для нагрева плоских тел, позволяющая гибко переходить от нагрева в продольном магнитном поле к поперечному и тем самым нагревать стальную ленту до и выше температуры точки Кюри на одной частоте, а также перераспределять мощность по ширине полосы.

10. Выявлена и теоретически обоснована особая точка в линиях непрерывной термообработки ленты. Поддержание постоянной температуры всего сортамента ленты в этой точке на расчетном уровне позволяет оптимизировать тепловые переходные режимы в линии и снизить брак, связанный со сменой номенклатуры ленты. На этом принципе строится запатентованная система управления в линиях горячего цинкования стальной ленты нового поколения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева - Л.: Энергоатомиздат, 1988, 271с.

Учебные пособия

2. Демидович В.Б. Проектирование электротермических установок – Л.: ЛЭТИ, 1988, 62 с.

3. Моделирование на ЭВМ индукционных электротермических установок.//Демидович В.Б., Немков В.С., Комракова Г.Д., Никаноров А.Н. – СПбЭТУ, 1993, 80с.

4. Современные электротехнологии и экономические преимущества электронагрева / группа авторов – Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1998, 368 с.

5. Современные энергосберегающие электротехнологии: Учеб. Пособие для вузов/ Блинов Ю.И. и др. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000, 564с.

Патенты

6. Demidovitch V., Goodlin W. A FURNACE WITH MULTIPLE ELECTRIC INDUCTION HEATING SECTIONS PARTICULARLY FOR USE IN GALVANIZING LINE - United States Patent # 6,180,933 –January 2001.

7. Demidovitch V., Blake E., Churchill R. SINGLE-POINT TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-SECTION LINE FURNACE - United States Patent # 6,259071 – July 2001.

Статьи, доклады и авторские свидетельства

8. Демидович В.Б., Немков В.С. Расчет цилиндрического индуктора с немагнитной загрузкой на ЭВМ. – В кн.: Промышленное применение ТВЧ. –Л, 1975, вып.15, с.38-45.

9. Демидович В.Б., Полеводов Б.С Численный расчет нагревателей периодического действия для немагнитных цилиндрических заготовок. – В кн.: Тезисы докладов 8-й Всесоюзной конференции по применению токов высокой частоты в электротермии. - Л.: 1975, с.25-26.

10. Демидович В.Б., Немков В.С., Полеводов Б.С. Электротепловая модель индукционного нагревателя немагнитных цилиндрических слитков.// Известия ЛЭТИ, 1976, вып. 203, с. 7-14.

11. Математические модели индукционных нагревателей слитков из алюминиевых сплавов/ Демидович В.Б., Немков В.С., Полеводов Б.С., Слухоцкий А.Е. – В кн.: Электронное моделирование – Киев, 1977, с.72-81.

12. Демидович В.Б. Оптимизация индукционных установок для градиентного нагрева слитков. – В кн.: Вопросы проектирования автоматизированных моделирующих и управляющих систем. – Куйбышев, 1978, вып.1, с.136-140.

13. Математическое моделирование индукционных систем с распределенными электромагнитными и тепловыми параметрами/ Демидович В.Б., Немков В.С., Полеводов Б.С., Слухоцкий А.Е // В кн.: Теория информационных систем и систем управления с распределенными параметрами – М.: Наука, 1978, с.33-38.

14. Демидович В.Б., Рапопорт Э.Я., Сабуров В.В. Оптимальное управление в сложных краевых задачах индукционного нагрева металла. – В кн.: Алгоритмизация и автоматизация технологических процессов и промышленных установок – Куйбышев, 1978, вып.9, с.126-135.

15. Демидович В.Б. К задаче оптимального управления двумерным температурным полем при индукционном нагреве цилиндрических слитков// Изв. ЛЭТИ, 1979, вып.255, с.11-14.

16. Точные методы и вычислительные алгоритмы в задачах оптимального управления индукционным нагревом металла/ Демидович В.Б., Немков В.С., Рапопорт Э.Я., Сабуров П.В //Известия ЛЭТИ, 1980, вып, 274., с. 41-49

17. Демидович В.Б., Немков В.С., Равкин М.А. Цифровое моделирование периодического индукционного нагрева алюминиевых слябов// Изв. ЛЭТИ, 1980, вып.273, с.75-78.
18. Демидович В.Б. Экономичный способ численного расчета электромагнитного поля в индукционных системах с сильно неоднородной загрузкой// Известия ЛЭТИ, вып.299, 1981, сс.21-26.
19. Характеристики краевого эффекта немагнитных полых цилиндров при индукционном нагреве / В.С.Немков, В.Б.Демидович, С.И.Никитин, И.А.Зайцева // Электротехника. – 1982. – № 8, с.14-16.
20. Немков В.С., Демидович В.Б. Экономичные алгоритмы численного расчета устройств индукционного нагрева// Электромеханика – 1984. – № 11, с.13–18.
21. Демидович В.Б., Руднев В.И., Стохниол А. Особенности расчета индукционного нагрева тел прямоугольной формы// Известия. ЛЭТИ, 1984, вып. 341, с. 68 –74.
22. Stochniol A., Demidovitch V., Nemkov V.S. The Efficient Method for the Solution of Induction Heating Problems – International Symposium of Electromagnetic Fields in Electrical Engineering – ISEF 85, September 26-28, 1985, Warsaw, Poland.
23. Демидович В.Б., Руднев В.И., Стохниол А.М Исследование краевых эффектов ферромагнитных тел прямоугольной формы// Известия ЛЭТИ, 1985, вып, 362,с.60 – 65.
24. Матричный подход к решению сложных краевых задач индукционного нагрева/ Демидович В.Б., Немков В.С., Зимин Л.С., Руднев В.И //Управление и оптимизация процессов технологического нагрева. – Куйбышев, 1986, с. 41 – 46.
25. Моделирование периодического нагрева цилиндрических изделий в индукторе с магнитопроводом /Буканин В.А., Демидович В.Б., Казьмин В.Е., Немков В.С.// Энергетика и транспорт, 1986, №5.
26. Демидович В.Б., Дорофеев Г.И., Рассудова Н.В Исследование процесса регулирования в высокочастотных установках для закалки// Известия ЛЭТИ, Сборник научных трудов, Л.,1986, вып. 373, с. 77 – 81.
27. Влияние конструкции и режимов работы индукционных нагревателей на их энергетические показатели/ Немков В.С., Демидович В.Б., Руднев В.И., Северянин А.И., Зеленин В.П. //Электротехника, 1986, № 3, с.23-25.
28. Стохниол А., Демидович В.Б., Немков В.С. Оптимальное управление двумерным температурным полем при индукционном нагреве тел прямоугольной формы// Proc. 5 Int. Symposium "Systems - Modelling - Control." – Zakopane, 1986, pp. 51- 56.
29. Демидович В.Б., Рассудова Н.В. Программа расчета электротепловых процессов и их параметров при индукционном нагреве тел плоской и цилиндрической формы// Алгоритмы и программы ГОСФАП СССР, 1987, № 5, с.7.
30. Цифровая модель непрерывного индукционного нагревателя слябов/ Демидович В.Б., Руднев В.И., Стохниол А., Карпухин М.Г// Известия ЛЭТИ, Сборник научных трудов, Л.,1987, вып. 382, с. 74 – 77.

31. Программа расчета электромагнитных и тепловых процессов поверхностной индукционной закалки/ Демидович В.Б., Рассудова Н.В., Щербакова И.Л., Шоршина В.К.// Алгоритмы и программы ГОСФАП СССР, 1988, № 8, с. 12.
32. Немков В.С., Демидович В.Б., Руднев В.И. Рациональное использование краевых эффектов в устройствах индукционного нагрева// Сб. статей: Высокочастотная техника для машиностроительного производства. М.: Энергоатомиздат, 1988.
33. Демидович В.Б., Немков В.С., Никаноров А.Н. Цифровое моделирование индукционного нагрева ленты в поперечном магнитном поле / 34 Intern. Wiss. Koll. TU Ilmenau, 1989, Vortragsreihe "Electrowarme", s.19 - 22.
34. Stochniol A., Nemkov V.S., Demidovitch V.B. Computer aided modeling of the continuous induction heating of slabs// Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Fields ISEF-89, Lodz, Poland, 1989, pp. 297 – 300.
35. Демидович В.Б., Немков В.С., Кондрашов С.В. Цифровое моделирование периодического индукционного нагрева немагнитных заготовок перед прессованием// Известия вузов. Электромеханика, 1990, № 10, с. 44 – 50.
36. Software for Modeling Induction Heating Devices using Personal Computers/ Demidovitch V.B., Rudnev V.I., Comracova G.D., Karpuchin M.G. //Proceedings of 8th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, COMPUMAG, July 7 - 11, 1991, Sorrento, Italy, vol.1, pp. 227 –229.
37. The Use of End and Edge Effects for Induction Heater Design/ Nemkov V., Demidovitch V., Rudnev V., Fishman O.// Proceeding XIIth Congress UIE, Montreal, Canada, 1992, pp. 180-187.
38. Сравнение индукционного нагрева крупногабаритных титановых заготовок на промышленной и низкой частотах/ Демидович В.Б., Комракова Г.Д., Стефанов Б.В., Юркевич М.В // Технология легких сплавов, 1992, № 11 – 12, с. 46 – 48.
39. Демидович В.Б., Комракова Г.Д., Стефанов Б.В. Расчет индукционной печи со стальным тиглем для плавки магния. – Технология легких сплавов, 1992, № 11 – 12, с. 48 – 51.
40. Demidovitch V.B., Komrakova G.D., Rudnev V.I. Electromagnetic characteristics of three-phase induction heaters// Proceedings of the Intern. Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF 93, Warsaw, Poland, 1993.
41. Demidovitch V.B., Rudnev V.I., Komrakova G.D Space Change of Eddy Current Power by Induction Heating of Steel Cylinders// Second International Conference on Computation in Electromagnetics. University of Nottingham, 12-14 April 1994, pp.186-189.
42. Demidovitch V., Poznayk I. Combined method of electromagnetic field calculation in induction crucible furnaces //40 Internationales wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, Germany, 1995, p. 37-41.
43. Демидович В.Б., Комракова Г.Д. Особенности трехфазных индукционных нагревателей тонких оболочек// Известия ГЭТУ, 1995, вып.483, с.40-44.
44. Modelling of 3D Electromagnetic Processes in Transverse Flux Induction Heaters / Muhlbauer A., Lessmann H.-J., Mohring J.-U., Demidovitch V., Nikanorov A.//

COMPUMAG 10th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Berlin, 1995, pp.444-445.

45. Demidovitch V. Special Software IndHeat for Modeling Induction Heating Processes// Proceedings of 3rd International Workshop on ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS EMF'96, Liege, Belgium, pp. 273-278, May 1996.

46. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Программный комплекс моделирования индукционного нагрева слябов//Известия ГЭТУ, выпуск 497, 1996, с.93-99.

47. Methods and Tools for All-Round Optimization of Transverse-Flux induction Heaters/ Muhlbauer A., Ruhnke A., Demidovitch V., Nikanorov A., Lupi S., and Dughiero F.// International Induction Heat Treating Symposium, Indianapolis, USA, September 1997, pp. 865-870.

48. Демидович В. Б., Растворова И. И., Смирнов Н. Н. Оптимизация индукционного нагревателя для резки труб. // Изв. ГЭТУ: Сб. Науч. Тр./СПбЭТУ им. В. И. Ульянова (Ленина). – С-Пб., 1997. – вып. 511. –с.95-98.

49. Demidovitch V. Modeling of Induction Heating Processes in Steel Industry// Proceedings of International Congress Electromagnetic Processing of Materials, Paris, vol. 2, May 1997, pp. 443-448.

50. Demidovitch V., Rastvorova I., Smirnov N. Optimization of induction heaters for the tube cutting technology// ISEF-97, Gdansk, Poland, 25-27 September, 1997.

51. Electrodynamics Forces During Transverse Flux Heating of Metal Strip/ Ruhnke A., Muhlbauer A., Nikanorov A., Demidobitch V., Dughiero F., and Lupi S. // Proceedings of International Congress Electromagnetic Processing of Materials, Paris, vol.2, pp.87-93, May 1997.

52. Advanced software for computation and design of induction billet heaters/ Demidovitch V., Smirnov N., Skvortsov V., Rudnev V. // International Induction Heating Seminar IHS-98, Padua, Italy, May 1998, pp. 451-458.

53. Optimization of induction heating devices: experience of the last 20 years/ Demidovitch V., Skvortsov V., Komrakova G., Tchmilenko F., Nikanorov A., Rastvorova I., Zlobina M.// International Induction Heating Seminar IHS-98, May, 1998, Padua (Italy), Proceedings of Seminar. –pp. 403-405.

54. Demidovitch V., Nelson J., Tchmilenko F., Zlobina M. Induction heating of strip and slabs: from simulation to design/ 43rd International Scientific Colloquium Technical University of Ilmenau, September, 1998, Ilmenau (Germany)// Proceedings of Colloquium. – pp. 21-24.

55. Demidovitch V., Nelson J., Tchmilenko F., Zlobina M. Induction heating of strip and slabs: choosing between gas fired and induction furnaces// ВЭЖК, Москва, июнь, 1999.

56. Demidovitch V., Tchmilenko F., Zlobina M. Nonlinear effects in the technologies of high frequency of ferrous strip// International Colloquium «Modelling of Material Processing», May, 1999, Riga (Latvia), Proceedings of Colloquium. – pp. 234-237.

57. Computer simulation of induction coils for heating steel plate products/ Demidovitch V., Komrakova G., Tchmilenko F., Skvortsov V., Zlobina M.// Proceedings

of 5th International Symposium on Electric and Magnetic fields (From Numerical Models to Industrial Applications), Ghent (Belgium), 17-19 May 2000.

58. Computer Models of Induction Heaters for Steel Plate Products/ Demidovitch V., Tchmilenko F., Scvortsov V., Komrakova G.// Proceedings of the 9th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, September 2000, Graz, Austria, pp.452-457.

59. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Злобина М.В. Нелинейные эффекты при индукционном нагреве ферромагнитных тел// Электротехнология, электротехника, электромеханика: Сб. науч. тр. – С-Пб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2000. – №. 1. – с.15-18.

60. Demidovitch V., Nelson J., Blake E. New Generation of Galvanizing Lines Utilizing Induction Heating Technology.// 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, April, 2000, Nagoya (Japan), pp. 224-229.

61. Advanced induction coils for heating steel plate products/ Demidovitch V., Tchmilenko F., Zlobina M., Komrakova G.// 3rd International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, April, 2000, Nagoya (Japan)– Proceedings of Symposium. –P. 218-223.

62. Methods of Induction Heating Steel Plate Products/.Demidovitch V, Komrakova G., Tchmilenko F., Chervinsky V.//Proceeding of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, September 12-13-14, 2001, pp.525-531.

63. Demidovitch V, Tchmilenko F., Malyshev A. Models and Single-Point Control System for Continuous Strip Galvanizing Lines Utilizing Induction Heating// Proceeding of the International Seminar on Heating by Internal Sources, Padua, September 12-13-14, 2001, pp.673-678.

64. Методы индукционного нагрева стальной ленты/ Васильев А.С., Демидович В.Б., Комракова Г.Д., Чмиленко Ф.В. //Электричество, №6, 2002. – С.23-29.

65. А.с. 675632 СССР. Устройство для индукционного нагрева заготовок/ Буканин В.А., Демидович В.Б., Клещев В.В. и др.(СССР) - №2368169, Заявлено 3.06.76, Оpubл. 29.05.79, Бюл. № 22// Открытия. Изобретения. - 1979, № 22, с.7.

66. А.с. 1192170 СССР, Способ индукционного нагрева металлических изделий/ Немков В.С., Демидович В.Б., Руднев В.И. - № 3627571/ 24-07, Заявлено 02.08.83, Оpubл. 15.11.85, Бюл. № 42// Открытия. Изобретения. - 1985, № 42,с.256.

67. А.с. 1198768 СССР. Способ управления нагревом изделий под горячую деформацию в индукционном нагревателе периодического действия/ Демидович В.Б., Немков В.С., Руднев В.И (СССР). - № 3754314/ 24-07, Заявлено 18.06.84, Оpubл. 15.12.85, Бюл. № 46// Открытия. Изобретения. - 1985, №46, с.266.

68. А.с. 1202082 СССР. Устройство для регулирования теплового режима методической индукционной установки/. Демидович В.Б., Немков В.С., Руднев В.И - №3775882/ 24-07, Заявлено 27.07.84, Оpubл. 21.12.85, Бюл. N 48// Открытия. Изобретения. - 1985, № 48, с. 258.

69. А.с. 1288945 СССР. Индукционное нагревательное устройство/ Демидович В.Б., Ильменский Э.Г., Немков В.С. и др.- №3874271, Заявлено 26.03.86, Оpubл. 8.10.86, Бюл. № 40// Открытия. Изобретения. - 1986, № 40, с.223.