

На правах рукописи



ГОРЕМЫКИН ВИТАЛИЙ АНДРЕЕВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЛОТКА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ
РАСПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электротехнологии и электротехника»
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Головенко Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты: **Сарапулов Сергей Федорович**,
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
директор Уральского энергетического
института;

Фаткулин Салават Мирдасович,
кандидат технических наук, ООО «РЭЛТЕК»,
директор научно-технического центра

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится 17 февраля 2016 года в 16:00 ч на заседании
диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого
совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ
ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан «__» декабря 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. На современных металлургических производствах существует дефицит в надежных и сравнительно простых устройствах для автоматизированного выкачивания алюминиевых расплавов из подовых стационарных печей в литейные машины и конвейеры. С одной стороны, задача эффективно решается с помощью поворотных печей на гидравлическом приводе. Но стоимость таких печей в 2-3 раза выше, чем стационарных. С другой стороны, задачу автоматизированного выкачивания из стационарных печей могут успешно выполнять электромагнитные лотки (далее – ЭМЛ) на базе плоских линейных индукционных машин (далее – ЛИМ).

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в разработку технологии ЭМЛ внесли выдающиеся ученые СССР: И.М. Кирко, Л.А. Верте, В.Д. Мищенко, А.Э. Микельсон, В.М. Фолифоров и другие, а в развитие теории плоских ЛИМ – Ю.К. Круминь, А.И. Вольдек, Ф.Н. Сарапулов, В.Н. Тимофеев и другие.

Несмотря на очевидные достоинства ЭМЛ не получили массового внедрения. В СССР внедрением ЭМЛ активно занималось СКБ Института физики АН Латвийской ССР, однако сегодня в России эксплуатируют не более 10 комплексов ЭМЛ. Продвижением ЭМЛ по всему миру занимаются компании Solios Thermal (Италия), SMS-Group (Германия) и другие. Мировая потребность в таких установках оценивается экспертами сотнями и тысячами штук. Она обусловлена простотой и доступностью технологии ЭМЛ применительно к стационарным подовым печам.

Низкая динамика внедрения ЭМЛ стала следствием его низкой эксплуатационной надежности. Средний срок наработки на отказ ЭМЛ не превышает полгода. По экспертной оценке, увеличения срока эксплуатации можно добиться за счет изменения толщины футеровки в месте установки индуктора ЭМЛ с 50 до 200 мм. Однако для этого необходимо увеличить полюсное деление индуктора, что приведет к усилению краевых эффектов.

Основные разработки и проектирование ЭМЛ были выполнены в 70-е годы прошлого века, поэтому для разработчиков были доступны лишь аналитические методы расчета с существенными допущениями. Но для решения задач комплексного проектирования новых топологий индукторов ЭМЛ известные подходы не приемлемы.

Актуальной научно-технической задачей является разработка новых и развитие известных подходов, алгоритмов и программ вычислительного и физического моделирования для анализа и исследования физических явлений в системе “индуктор-канал” ЭМЛ.

Диссертационное исследование проведено в соответствии с соглашением №250 от 29.05.2007 г. между ФГАОУ ВПО “Сибирский федеральный университет” и ООО “Красноярский металлургический завод” по теме “Разработка оборудования и технологий перелива металла из печи (миксера) в раздаточный миксер МГД-лотком”.

Объект исследования – индуктор ЛИМ для выкачивания расплава по наклонному каналу из подовой стационарной печи в литейную машину или конвейер.

Предмет исследования – электромагнитные и гидродинамические физические процессы в электромеханической системе «индуктор-канал» в процессе выкачивания алюминиевых расплавов.

Цель диссертации: развитие методов численного и физического моделирования для исследования физических явлений, лежащих в основе электромеханического преобразования энергии в системе «индуктор-канал» ЭМЛ, для достижения высокой технологической и энергетической эффективности.

Основные задачи:

1. Анализ опыта эксплуатации ЭМЛ в условиях металлургических производств, анализ подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих их проектирование и надежность, выбор решений для новой конструкции ЭМЛ.

2. Обоснование возможности получения приемлемой технологической эффективности путем оптимизации конструктивных параметров плоской ЛИМ.

3. Разработка универсального алгоритма взаимосвязанного трехмерного анализа электромагнитных и гидродинамических процессов в системе «индуктор-канал» с учетом распределённого поля скоростей в канале для исследования основных закономерностей работы ЭМЛ.

4. Исследование физических процессов на лабораторных образцах ЭМЛ с твердометаллическим и жидкометаллическим рабочим телом для подтверждения эффективности предложенной конструкции ЛИМ и верификации численных моделей.

5. Разработка электрического эквивалентирования схемы ЭМЛ с учетом взаимных индуктивностей для исследования различных схем электропитания индуктора.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

– предложен подход к расчету и построению несимметричных электрических схем замещения ЭМЛ в трехфазном представлении на основе взаимных индуктивностей, выполнен анализ возможных схем электропитания, подтверждена работоспособность ЛИМ при схеме соединения обмоток AZBXCY и схеме электропитания «треугольник»;

– обоснована теоретически и экспериментально подтверждена работоспособность конструкции плоской ЛИМ для ЭМЛ с количеством полюсов $2p=2$ на активную длину машины при работе на зазоре 200 мм;

– получены новые количественные закономерности изменения интегральных и дифференциальных параметров ЭМЛ с учетом поля скоростей в канальной части и стартовых условий работы;

– разработан универсальный комбинированный алгоритм взаимосвязанного анализа электромагнитного и гидродинамического полей в системе «индуктор-канал» в трехмерной постановке с учетом

распределённого поля скоростей для поддержки комплексного проектирования ЭМЛ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– предложенный алгоритм анализа взаимосвязанного электромагнитного и гидродинамического полей может быть применен для получения уточненных гидродинамических характеристик системы «индуктор-канал», а также при подготовке к проектированию смежных индукционных устройств с жидкометаллическим рабочим телом;

– концепция построения топологии индуктора с круглым сечением ярма апробирована при проектировании опытно-промышленных и серийных образцов ЛИМ для силового воздействия на алюминиевые расплавы (марки ЛИМ200, ЛИМ380 и ЛИМ550) и показала практически свою высокую эффективность;

– результаты численных расчетов и физического моделирования использованы при построении систем электропитания лабораторного образца ЛИМ62 и полномасштабного опытно-промышленного образца ЛИМ200.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе были использованы аналитические методики расчетов МГД-машин предложенных известными советскими учеными: А.И. Вольдеком, Н.М. Охременко, В.А. Глухих, Л.А. Верте, В.П. Полищуком и другие.

Анализ электромагнитного поля в устройстве проведен численно с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в комбинации с методами регрессионного анализа. Мультидисциплинарный анализ проведен с помощью МКЭ в коммерческом программном комплексе ANSYS (академическая лицензия СФУ 00144095) с использованием модулей Mechanical и FlotranCFD. Исследования физических моделей и опытно-промышленных образцов проведены с применением теории планирования эксперимента, математической статистики, методик и технологий обработки данных National Instruments.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численная модель и алгоритм взаимосвязанного анализа электромагнитного и гидродинамического полей в системе «индуктор-канал» в трехмерной постановке с учетом распределённого поля скоростей и результаты численного моделирования.

2. Подход к расчету и построению несимметричных электрических схем замещения ЭМЛ в трехфазном представлении на основе взаимных индуктивностей.

3. Сравнение результатов численного и физического моделирования для опытного и опытно-промышленного образца ЭМЛ.

4. Рекомендации по применению ЭМЛ с количеством полюсов $2p=2$ на активную длину машины при работе на зазоре 200 мм и совершенствованию их конструкции.

Степень достоверности полученных результатов подтверждена удовлетворительным совпадением результатов вычислительного

эксперимента, построенного на базе разработанных численных моделей, с результатами натурного эксперимента на лабораторной установке и опытно-промышленном образце.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы были представлены на: пятнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” Московского энергетического института (технического университета) (г. Москва, 2009), XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых “Современные техника и технологии” Томского политехнического университета (г. Томск, 2009 (2011)), X Международной научно-практической конференции (г. Железногорск, 2010), Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы (AIS’10)» (г. Лазурный, 2010), III Международном конгрессе «Цветные металлы – 2011», XVII Международном конгрессе «Energy efficient, economically sound, ecologically respectful, educationally enforced electrotechnologies» (г. Санкт-Петербург, 2012), Международной выставке «ALUMINIUM’12» (г. Дюссельдорф, 2012), АЛЮСИЛ – 2013, (г. Москва, 2013).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы в рамках х/д тем №20090, №10166, №10167 с Сибирским федеральным университетом, а также при проектировании и внедрении опытно-промышленного образца электромагнитного перемешивателя марки ЛИМ550 (производство ГК ONTECOM™) на ООО «Красноярский металлургический завод» (г. Красноярск).

Публикации. Автор опубликовал 30 научных работ, из которых 20 по теме диссертации (10 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК, 2 патента РФ на полезные модели, 8 статей и тезисов докладов на всероссийских и международных научно-практических конференциях и выставках). Список трудов представлен в автореферате.

Личный вклад автора заключается в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности применения малополюсных индукторов в составе ЭМЛ; разработан алгоритм анализа взаимосвязанных электромагнитных и гидродинамических процессов в трехмерной постановке; разработан лабораторный и опытно-промышленный образец, обоснована эффективность подхода к построению несимметричных трехфазных схем замещения на основе взаимных индуктивностей; в публикациях, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: разработка и описание параметрических моделей ЛИМ, проведение численных и физических экспериментов, построение оптимизационных алгоритмов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы из 107 наименований и 1 приложения. Основная часть работы изложена на 177 страницах, содержит 10 таблиц и 82 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена и обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, отражены основные научные результаты, их научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также краткое содержание работы.

В первом разделе приведены основные термины и определения для устройств бегущего магнитного поля; изложены основы образования электромагнитных сил в проводящих средах; показано влияние краевых эффектов на характеристики индукторов; рассмотрены схемы силового электропитания ЭМЛ. Дополнительно сформулированы требования для повышения надежности и эффективности работы ЭМЛ.

В технологическом цикле производства алюминиевых сплавов обязательным этапом является транспортировка расплава между печами или дозирование при его разливке. С этой целью используют специализированные электромеханические преобразователи. Из всего разнообразия типов устройств наиболее простыми и эффективными являются установки на основе плоских ЛИМ под наклонными каналами (ЭМЛ). Эскиз такой установки представлен на рисунке 1, *а*. Индуктор 1 создает бегущее магнитное поле вдоль оси канала, силовые линии которого пересекают расплав 2 и замыкаются через пассивный сердечник 3 (ПС). Под действием наведенных объемных электромагнитных сил расплав поднимается по каналу и попадает в раздаточный лоток, а затем в литейную машину 5.

Для управления режимом работы ЭМЛ используют тиристорные

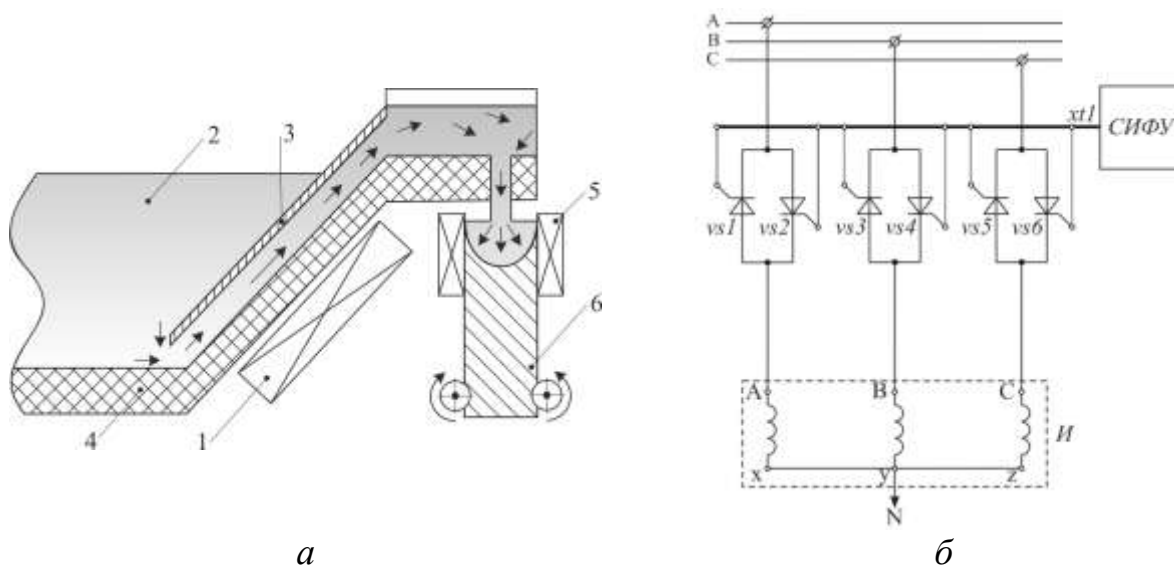


Рисунок 1 – Эскиз установки ЭМЛ (*а*)
и схемы его включения в трехфазную сеть (*б*)

регуляторы напряжения (Рисунок 1, *б*). Электропитание выполняют от промышленной трехфазной сети (50 Гц). Для регулирования выходного

напряжения используют систему импульсно-фазового управления (СИФУ). Обмотки индуктора ЭМЛ (*I*) включают по схеме «звезда с нейтралью».

Анализ известного опыта применения ЭМЛ и экспертная оценка показали, что износостойкость можно увеличить, за счет замены тонких керамических вставок на износостойкую футеровку толщиной до 200 мм. Но при таких зазорах могут работать только малополюсные индуктора. А электропитание должно производиться от источников питания пониженной частоты.

Инженерные и аналитические методики расчета не позволяют получить достоверные данные для разработки малополюсных конструкций индукторов. Поэтому рационально использовать численные методы расчета.

По результатам первого раздела сделан вывод о необходимости разработки малополюсной конструкции индуктора ЭМЛ для работы на рабочем зазоре до 200 мм и применения численных методов для поддержки его проектирования.

Во втором разделе разработана универсальная численная модель системы «индуктор-канал» ЭМЛ для взаимосвязанного анализа характеристик электромагнитного и гидродинамического полей в трехмерной постановке в пространстве конструктивных параметров индуктора и параметров системы электропитания.

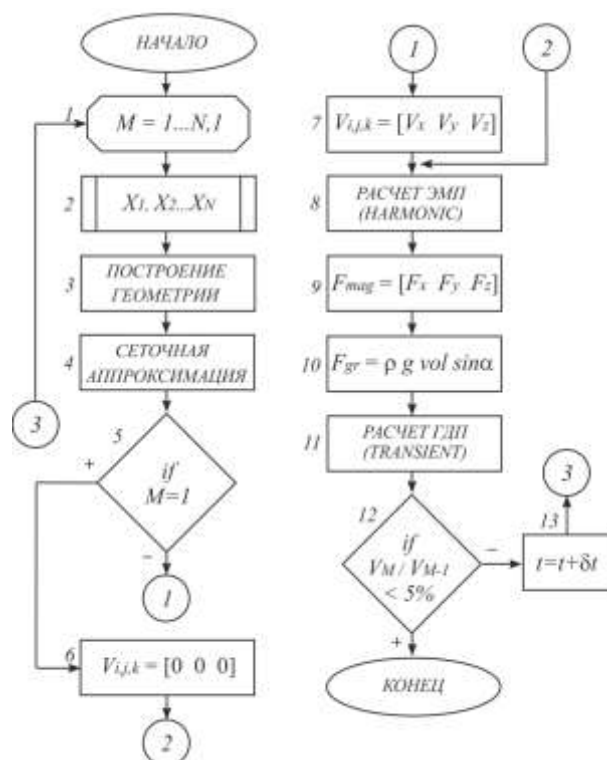


Рисунок 2 – Алгоритм расчета взаимосвязанных электромагнитной и гидродинамической задач

Модель функционирует по итерационному алгоритму (Рисунок 2.). Программная реализация алгоритма выполнена на языке APDL (ANSYS). Главными составными элементами являются модуль анализа квазистационарного ЭМП и модуль нестационарного анализа гидродинамических полей (ГДП). Модули могут быть использованы как отдельно, так и совместно друг с другом.

При взаимосвязанном анализе ЭМП с ГДП выполняют итерационный обмен массивами скоростей и объемных электромагнитных сил. Условием сходимости является снижение пульсаций скорости до 5% по отношению к предыдущим итерациям.

Эскиз системы «индуктор-канал» представлен на рисунке 3. Система состоит из пяти основных областей. Катушечные группы (*I*) многофазной обмотки размещены на ярме

зубчатого магнитопровода (2), параллельно активной части магнитопровода на расстоянии Δ (рабочий зазор) расположен канал с расплавом (3), выше которого размещен массивный ферромагнитный пассивный сердечник (4). Вокруг находится воздух. Для сокращения вычислительных ресурсов был введен ряд минимальных допущений и ограничений, упрощающих систему.

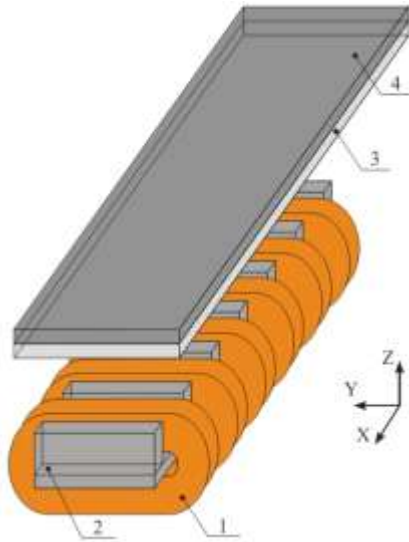


Рисунок 3 – Эскиз малополюсной плоской ЛИМ

Электромагнитное поле с учетом движения среды в расчетной области описывается с помощью уравнений Максвелла. Решение уравнений производят относительно векторного магнитного потенциала \bar{A} и учетом уравнения связи $rot\bar{A} = \bar{B}$. В итоге получают результирующее уравнение:

$$\nabla\bar{A} - \mu\gamma\frac{\partial\bar{A}}{\partial t} + \mu\gamma[\bar{V} \cdot rot\bar{A}] = -\mu\bar{j}_{cm}. \quad (1)$$

где \bar{j}_{cm} – плотность сторонних токов (A/m^2); γ – удельная электрическая проводимость среды (Cm/m); $\mu = \mu_0\mu_r$ – магнитная проницаемость среды ($Гн/м$); $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ – абсолютная магнитная проницаемость ($Гн/м$); μ_r – магнитная проницаемость среды (*o.e.*); \bar{V} – вектор скорости ($м/с$); t – время (*с*).

Для однозначного решения уравнения (1) добавляют систему граничных условий:

Условие Неймана:

$$\bar{H}_n = 0.$$

Условие Дирихле:

$$\bar{A}_\tau = 0.$$

Анализ системы «индуктор-канал» с помощью критериев подобия показал, что в канальной части имеет место турбулентный режим течений расплава ($Re = 10^5 \sim 10^6$), а движение расплава оказывает влияние на магнитное поле индуктора ($Re_m = 1,5 \sim 15$). Поэтому необходимо учитывать взаимное влияние электромагнитных и гидродинамических процессов в канальной части.

Гидродинамические процессы в расчетной области с учетом объемных электромагнитных сил $f_{эм}$, могут быть описаны системой дифференциальных уравнений (2) и (3) совместно с двухпараметрической моделью турбулентности (SST) (4) и (5):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \overline{\frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_j}} \right) + g_i + \frac{f_{эм}}{\rho}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (5)$$

где ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии (m^2/c^2); ω – удельная скорость диссипации (о.е.); μ_t – коэффициент динамической турбулентной вязкости ($кг/(м с)$); τ_{ij} – компоненты тензора рейнольдсовых напряжений (m^2/c^2); $\beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega, \sigma_{\omega 2}$ – модельные константы.

На первом этапе были выполнены исследования системы «индуктор-канал» в пусковом режиме с применением модуля ЭМП. Пусковой точкой в рабочем интервале скольжений ЛИМ принята координата $s = 1$ (расплав относительно индуктора неподвижен).

В ходе исследований была подтверждена эффективность работы индуктора с ПС (Рисунок 4). Использование ПС дает в среднем увеличение эффективности на 80%.

Определена зависимость компоненты силы F_τ от частоты тока f и толщины расплава h_k . Поверхность отклика представлена на рисунке 5, а. Характеристика имеет низкочастотный оптимум. По мере увеличения толщины расплава он перемещается в зону низких частот. На границе исследуемого интервала (50 мм) оптимальная частота находится в окрестности 10 Гц.

По поведению оптимальных значений частоты f_{opt} можно заключить, что увеличение h_k приводит к экспоненциальному уменьшению частоты (Рисунок 5, б). В теории индукционных устройств оперируют понятием глубины проникновения магнитного поля δ в металл. Если δ намного меньше толщины расплава, то в удаленных слоях расплава могут возникать обратные течения, что неизбежно приведет к уменьшению расхода и снижению технологической эффективности ЭМЛ.

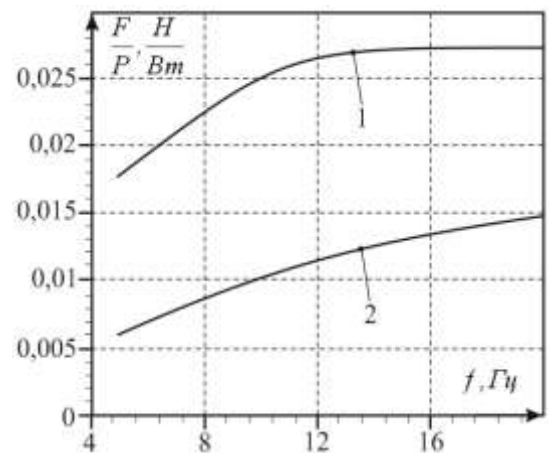


Рисунок 4 – Зависимость показателя эффективности работы ЭМЛ F/P от частоты f (с ПС (1) и без ПС (2))

На основании численного анализа характеристик ЭМП получено выражение для определения эффективной глубины проникновения бегущего электромагнитного поля индуктора ЭМЛ в расплав:

$$\delta = (1 + k\xi) \cdot \sqrt{\frac{2}{\sqrt{[(\xi/\Delta)^4 + (2\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \mu)^{2+\xi}] + (\xi/\Delta)^2}}}, \quad (6)$$

где $\xi = \pi \Delta / \tau$ – корректирующий коэффициент эффективности преодоления немагнитного зазора бегущей электромагнитной волной; $k = 1 \div 2$ – коэффициент влияния ПС на глубину проникновения электромагнитной волны.

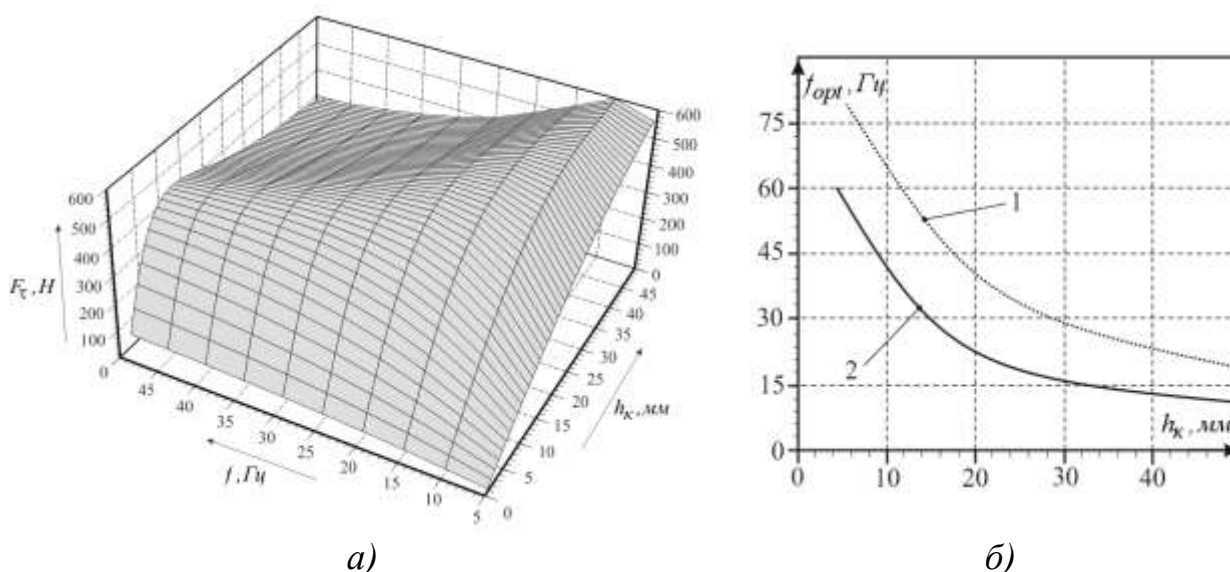


Рисунок 5 – Поверхность отклика F_τ в пространстве тока f и h_k (а) и кривые оптимальных частот f_{opt} (без ПС (1) и с ПС (2)) (б)

Установлено влияние краевого эффекта на пусковые условия системы «индуктор-канал» (Рисунок 6). По мере увеличения стартового уровня расплава относительно индуктора возрастает электромагнитное усилие F . В зоне расположения индуктора усилие интенсивней, чем за его пределами. На частотах ниже 7 Гц определены самые плохие условия для выкачивания при всех углах наклона канала α . На более высоких частотах пороговое значение высоты расплава равно $0,3 \text{ м}$. Следовательно, можно сформулировать условие для диапазона рабочих частот – $7 \leq f_{cm} \leq 20 \text{ Гц}$.

При увеличении ширины расплава относительно индуктора сокращается влияние поперечного краевого эффекта и интегральное усилие возрастает (Рисунок 7). Но боковые части канала попадают в зону ослабленного поля, что неизбежно приводит к возникновению обратных гидродинамических потоков. При изменении ширины канала в диапазоне от 100 до 300 мм усилие возрастает до 10 раз (для 20 и 5 Гц). Переход зоны индуктора сопровождается снижением скорости роста для частоты 20 Гц ,

стабильностью для 10 Гц и ускорением для 5 Гц. Пересечения кривых свидетельствуют об изменении оптимальных характеристик системы «индуктор-канал».

Исследования характеристик ЭМП в системе «индуктор-канал»

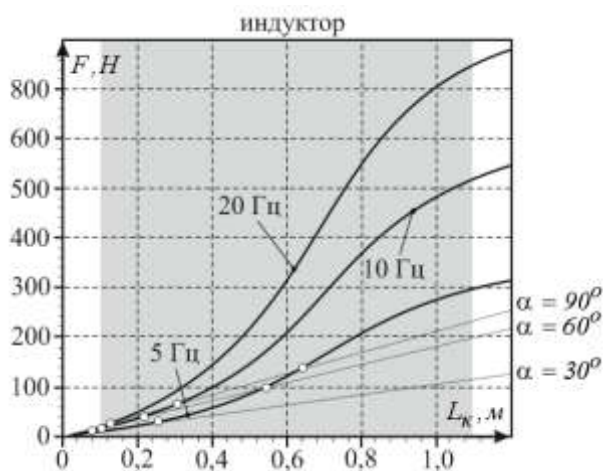


Рисунок 6 – Зависимость электромагнитного усилия F от начального уровня расплава l_k

позволили сформировать предположение о возможности перехода к более гибкой топологии индуктора ЭМЛ – индуктору с круглым сечением ярма. Отличительной особенностью такой конструкции являются независимые друг от друга диаметр ярма $d_{я}$ и ширина зубцов $b_{я}$. Сопоставление характеристик двух топологий индукторов при равных условиях доказало состоятельность предположения. Разница значений характеристик не превышает 10%. Однако предложенная конструкция имеет преимущества по массе активных материалов, условиям охлаждения и возможностям выполнения гибкого проектирования.

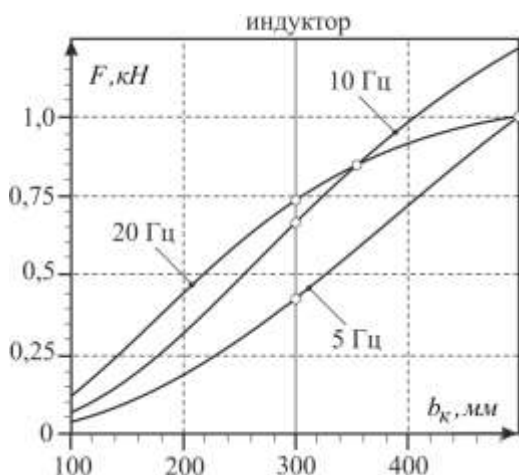


Рисунок 7 – Зависимость электромагнитного усилия F от ширины канала с расплавом b_k .

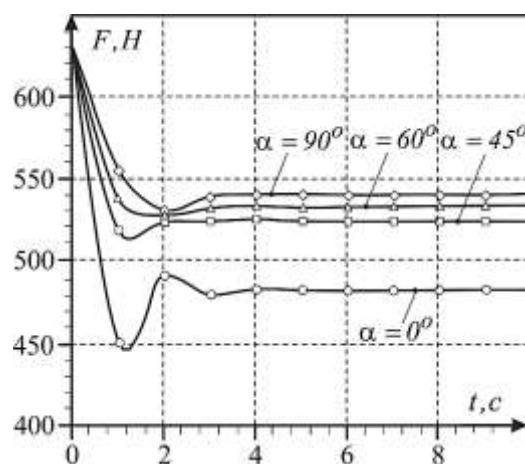


Рисунок 8 – Изменение усилия F в процессе взаимосвязанного расчета ЭМП и ГДП

Для взаимного учета процессов при решении электромагнитной и гидродинамической задач работы ЭМЛ были выполнены численные расчеты в соответствии с алгоритмом на рисунке 2.

В результате выявлен колебательный характер изменения усилия в процессе разгона (Рисунок 8). Длительность переходного процесса зависит от гидростатического давления в канале и находится в диапазоне от 2 до 4 секунд. Максимальные колебания доходят до 30% от пускового усилия. В

установившемся режиме минимальное усилие характерно для $\alpha = 0^\circ$, а максимальное, соответственно, для $\alpha = 90^\circ$.

Исследования системы «индуктор-канал» без учета алгоритма (Рисунок 2) позволили выявить завышение значений скоростей расплава более 40%. При $\alpha = 0^\circ$ максимальная скорость превысила синхронный барьер.

На основании исследований определено условие образования стабильного транзитного течения расплава на выходе канала:

$$F_{эм} = (1,2 \div 1,3) \rho g V \sin \alpha, \quad (7)$$

где ρ – плотность расплава ($кг/м^3$); $g = 9,8066 м/с^2$; V – объем расплава ($м^3$).

Профили скоростей для характерных сечений канала представлены на рисунке 9. Для всех кривых характерен провал в центральной части канала и экстремальное поведение по его бокам. На входе канала выявлен максимальный провал скорости, а на выходе – минимальный.

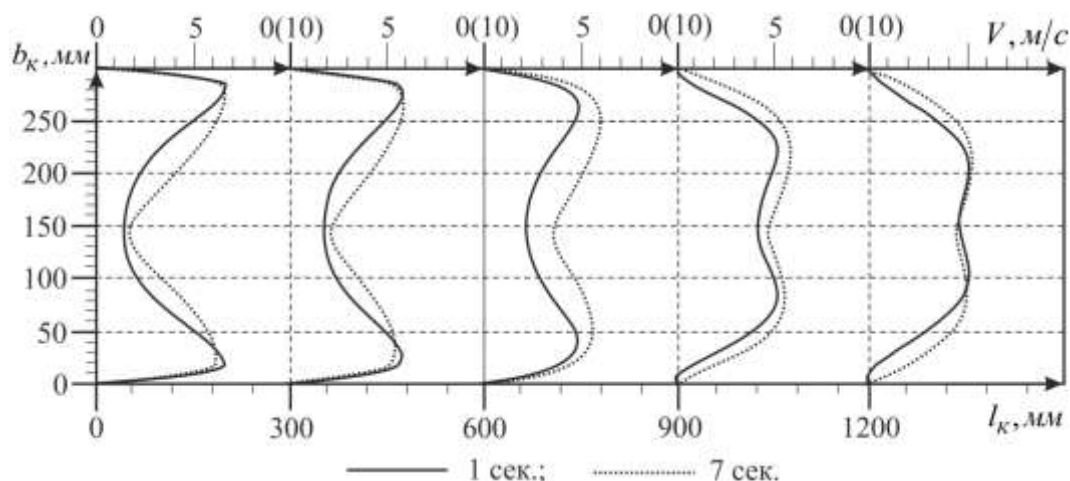


Рисунок 9 – Профили скоростей в характерных сечениях канала

На рисунке 10 представлены профили скоростей для разных частот питающего напряжения. Определено возникновение сильных обратных течений на частотах ниже 12 Гц. Оптимальный диапазон частот принят 13-20 Гц.

По разделу сделаны выводы, что при проектировании ЭМЛ важно учитывать влияние поля скоростей расплава, а также выполнять синтез характеристик канала и индуктора для получения приемлемой технологической и энергетической эффективности.

В третьем разделе представлены результаты исследования электропитания индуктора ЭМЛ, физического моделирования на лабораторном и опытно-промышленном образцах системы

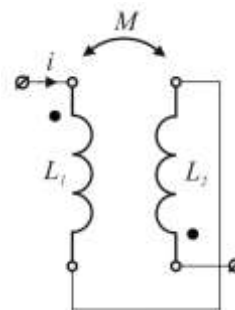


Рисунок 11 – Модель ВИ

«индуктор-канал», а также верификация результатов численного моделирования.

Для изучения возможностей подключения к системе электропитания необходимо знать поведение электрических характеристик индуктора ЭМЛ. Для этого был разработан подход описания электромагнитной части индуктора с помощью схемы замещения. Подход основан на моделях взаимных индуктивностей (ВИ) (Рисунок 11).

Исследуемая конструкция индуктора может быть описана с помощью 15 ВИ. Если общее количество катушек индуктора обозначить n , то значения индуктивности каждой отдельной модели необходимо уменьшить в $(n-1)$ раз. Для сохранения значений ВИ в рамках модели необходимо определить приведенное значение коэффициента связи, которое определяют из выражения:

$$k' = \frac{M}{\sqrt{\frac{L_1 L_2}{(n-1)^2}}}, \quad (8)$$

где k' – приведенный коэффициент связи; M – взаимная индуктивность (ΓH); L_1, L_2 – собственные индуктивности (ΓH).

Проверка работоспособности подхода была выполнена в ходе измерений на физической модели индуктора ЛИМ 62. Для схем коммутаций катушек AZBXCУ ($2p=2, q=1, \theta=60^\circ$) и ААУУСС ($2p=2, q=2, \theta=60^\circ$) исследованы по три схемы электропитания («треугольник», «звезда с нейтральным проводом» и «звезда без нейтрального провода»). Средняя погрешность экспериментальных данных и численных расчетов не превысила 7,2%. В таблице 1 приведен пример для схемы электропитания «треугольник» (коммутация AZBXCУ).

Таблица 1 – Результаты численного и физического экспериментов

Опыт	I_a, A	I_b, A	I_c, A	U_a, B	U_b, B	U_c, B			
<i>Равные токи</i>									
	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_{ab}, A	I_{bc}, A	I_{ca}, A	U_a, B	U_b, B	U_c, B
физ. мод.	14,1	16,8	12,9	8,1	9,0	8,8	21,0	17,0	16,0
числ. мод.	14,97	17,07	13,31	8,6	9,0	9,0	21,0	17,0	16,0
$\delta, \%$	6,2	1,6	3,2	6,2	0	2,3	-	-	-
<i>Равные напряжения</i>									
физ. мод.	10,2	13,6	11,0	6,5	7,1	6,6	20,0	20,0	20,0
числ. мод.	10,82	13,76	11,23	6,67	7,51	6,9	20,0	20,0	20,0
$\delta, \%$	6,1	1,2	2,1	2,6	2,6	4,5	-	-	-

В результате дополнительных исследований доказана перспективность применения схем «треугольник» и «звезда с нейтральным проводом» для электропитания индуктора ЭМЛ. Обоснование выполнено на примере векторных диаграмм (ВД) (Рисунок 12). Указанные схемы показывают

приемлемый сдвиг фаз между фазными токами. Этот фактор определяет условия образования бегущего магнитного поля, а значит, и эффективность транспортировки расплава.

Следует учитывать, что индуктор ЭМЛ необходимо питать от преобразователя частоты (ПЧ). Схема «звезда с нейтральным проводом» не может быть использована из-за высокой вероятности выхода из строя конденсаторного блока. Поэтому для нее следует использовать специальные ПЧ с отдельной силовой частью для каждой фазы.

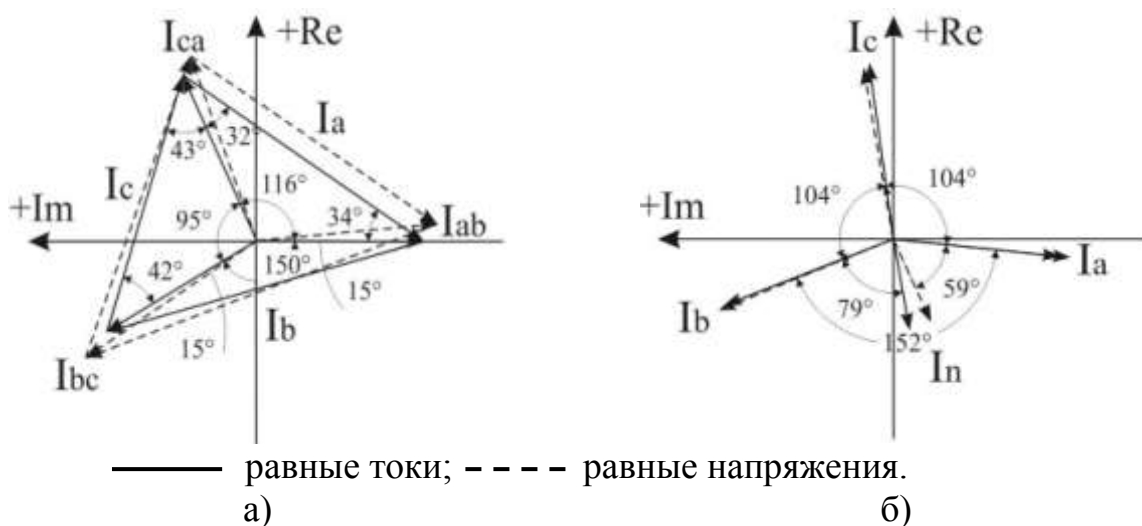


Рисунок 12 – ВД для схемы «треугольник» (а) и «звезда без нейтрального провода» (б) (AZBXCY)

Для проверки адекватности результатов численного моделирования ЭМП и ГДП был разработан лабораторный стенд ЭМЛ на основе физической модели индуктора ЛИМ62 (Рисунок 13, а). В качестве рабочего тела использован эвтектический расплав InGaSn. Стенд состоит из индуктора (1), наклонного канала с рабочим телом (2), ПС (3), расширительного бочка (4), системы патрубков (5) и измерительных приборов (6). Электропитание производилось от трехфазного ЛАТРа. Возможности стенда позволяют выполнять исследования при разных углах наклона канала, немагнитных зазорах, заполнениях канальной части и схемах электропитания. Для измерений электрофизических параметров использован анализатор энергии PowerQ+.

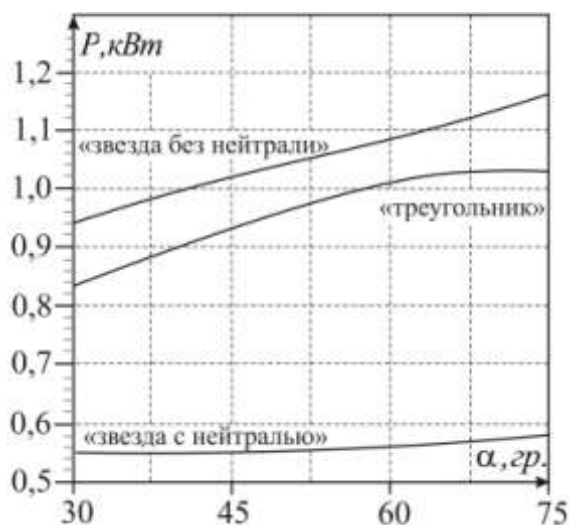
На основании экспериментальных исследований определено, что схема коммутаций катушек AZBXCY потребляет на 45% меньше мощности, чем ААУУСС. Среди исследуемых схем лучшие результаты показали схемы, указанные выше. В среднем схема «звезда с нейтральным проводом» эффективней на 45% относительно «треугольника».

Экспериментально установлено, что с увеличением угла наклона канала α происходит экспоненциальный рост значений тока I , необходимого для начала транзитного течения (Рисунок 14). Исследования системы показали удовлетворительную сходимость с результатами численного моделирования. Погрешность обусловлена недостаточным учетом

особенностей реальной геометрии и нелинейностей свойств материалов при проведении численного моделирования.



а)



б)

Рисунок 13 – Лабораторный стенд системы «индуктор-канал» (а), изменение величины потребляемой мощности P от угла наклона канала α для схемы AZBXCУ («звезда без нейтрали», «звезда с нейтралью» и «треугольник») (б)

Для проверки концепции конструкции магнитопровода с круглым сечением ярма был разработан опытно-промышленный образец ЭМЛ марки ЛИМ200 с твердометаллическим рабочим телом в масштабе 1:1. Для исследования его характеристик изготовлен измерительный стенд (Рисунок 15). Стенд состоит из индуктора с воздушной системой охлаждения (1), алюминиевой пластины (2), ПС (3), регулируемой подставки (4), датчика измерения усилия (5) и блока индикации (6). Питание индуктора также реализовано от ПЧ.

В ходе комплексного экспериментального исследования ЛИМ200 требуется оценить важнейшие режимные параметры и электромагнитное усилие. В составе измерительной схемы предусмотрены датчики тока, напряжения, магнитного потока и силы. Потoki численных данных с датчиков по защищенным измерительным каналам поступают в АЦП, а затем, посредством пользовательского интерфейса, сконцентрированы на ПК. Для обработки

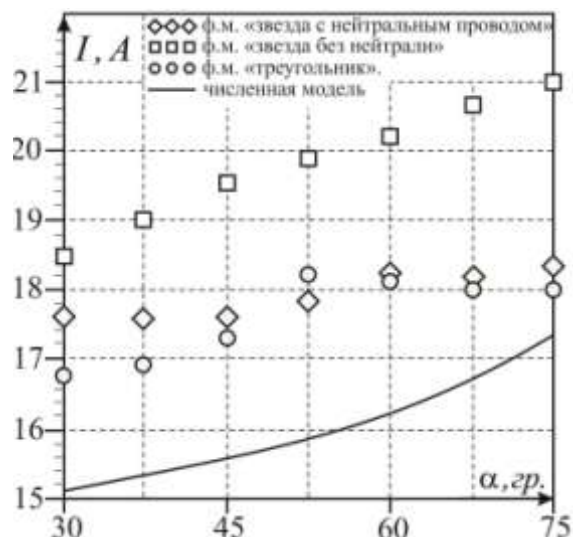


Рисунок 14 – Зависимости величины пускового тока I от угла наклона канала α (физическое и численное моделирование)

результатов измерения использованы программные модули специализированного продукта Signal Express компании National Instruments.

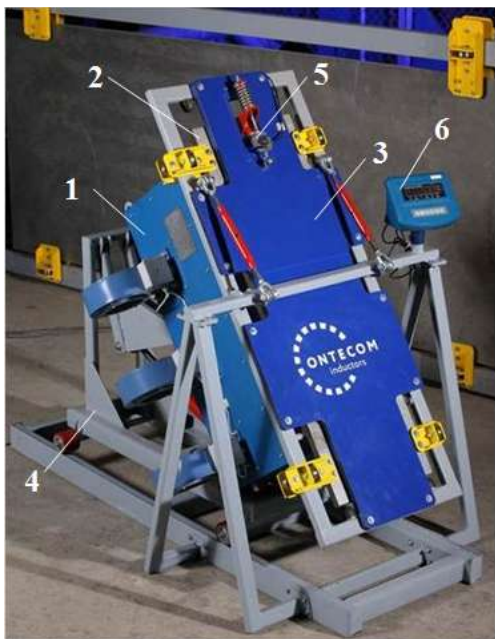
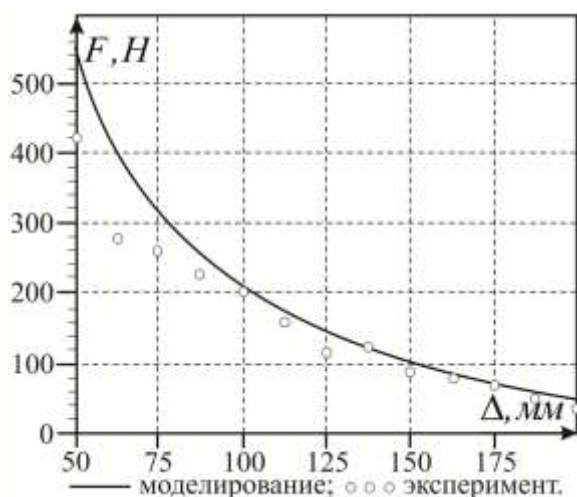


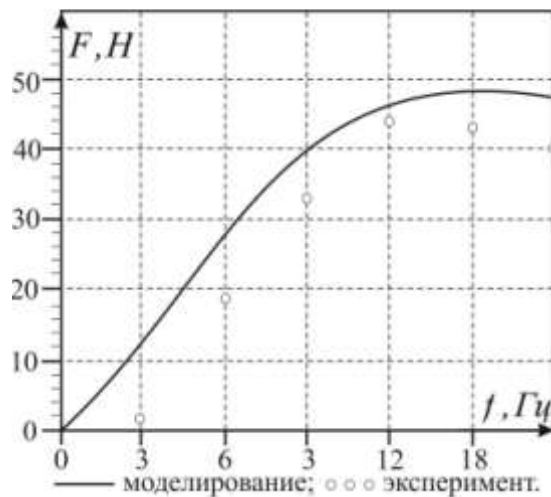
Рисунок 15 – Модель малополюсного индуктора

Конструкция опытно-промышленного образца ЛИМ200 не предусматривает жидкостное охлаждение, которое затруднительно обеспечить в лабораторных условиях. Поэтому использовано принудительное воздушное охлаждение. Это обстоятельство ограничило достижение необходимых линейных токовых нагрузок в ходе исследований. Предельная величина токовой нагрузки во всех экспериментах ограничена значением $AS=0,7 \cdot 10^5 \text{ A/м}$.

В результате серии экспериментов получена зависимость интегрального электромагнитного усилия F от величины рабочего зазора Δ в диапазоне от 50 до 200 мм (Рисунок 16, а). По кривым можно проследить, что до значений зазора от 50 до 100 мм происходит резкое снижение усилия. От 100 до 200 мм характеристика становится более полой. Уменьшение усилия на 200 мм составляет 450 Н или десятикратное в сравнении с 50 мм. Сопоставление результатов численного моделирования с данными эксперимента подтвердило характер изменения кривых. Расхождения составили 15-18,5% в зависимости от величины зазора.



а)



б)

Рисунок 16 – Сопоставление результатов численного и физического моделирования для опытно-промышленного образца ЛИМ200 (при $AS=70000 \text{ A/м}$)

Полученная экспериментально зависимость усилия от частоты питающего напряжения f показана на рисунке 16, б. Зависимости имеют

низкодобротный оптимум в районе 12-20 Гц. Закономерности поведения модели при численном моделировании совпали с экспериментальными характеристиками при усредненном значении расхождения не более 15%.

В результате экспериментальных исследований полномасштабного образца ЭМЛ установлена работоспособность концепции индуктора с круглым сечением магнитопровода. Определено, что для повышения эффективности работы ЭМЛ на зазоре 200 мм необходимо оснащать катушки принудительным жидкостным охлаждением для увеличения линейных токовых нагрузок до значений $1,4 \div 1,5 \cdot 10^5$ А/м. В этом случае будет выполняться условие (7).

Экспериментально подтвержден экстремальный характер зависимости тягового усилия от частоты. С целью снижения требований к ИП в качестве рабочей частоты рекомендовано использование значения $f = 15$ Гц. Воздействие поля ЭМЛ при такой частоте обеспечивает усилие, близкое к максимальному. При этом индуктивное сопротивление будет сравнительно небольшим.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложении представлен акт о внедрении опытно-промышленного образца линейной индукционной машины ЛИМ550 на ООО «Красноярский металлургический завод» (г. Красноярск)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные достижения и результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Обоснована совокупность технических, технологических, экономических критериев оценки ЭМЛ, по которым определены направления повышения технологической эффективности и надежности системы. На основании экспертной оценки сформулированы требования к увеличению рабочего зазора между индуктором и расплавом с 50 мм (у известных ЭМЛ) до 200 мм. Для работы на таком зазоре предложено использовать конструкцию индуктора с $2p=2$ полюсами и числом пазов на полюс $q=1$;

2. На основании численных экспериментов определены зависимости эффективности работы индуктора с применением ферромагнитного ПС. Увеличение интегрального усилия в среднем составило 80%. Предложено уточненное выражение для определения эффективной глубины проникновения индуктора. В выражении учтено влияние величины немагнитного зазора и ПС. Увеличение точности применительно к исследуемой конструкции индуктора ЭМЛ составило 13,5%;

3. Разработана универсальная численная модель системы «индуктор-канал» ЭМЛ для взаимосвязанного анализа характеристик электромагнитного и гидродинамических полей в трехмерной постановке в пространстве конструктивных параметров индуктора и параметров системы электропитания. Алгоритм модели позволяет учесть влияние

распределенного поля скоростей движущегося расплава на магнитное поле индуктора. В результате применения модели удалось увеличить точность расчета поля скоростей в расплаве на 30% по отношению к расчетам без учета поля скоростей;

4. Предложена концепция применения магнитопровода с круглым сечением ярма для уменьшения массогабаритных показателей, упрощения конструкции, улучшения условий охлаждения и повышения гибкости при проектировании. Изготовлен опытно-промышленный образец ЭМЛ такой конструкции. Исследования на твердометаллическом рабочем теле доказали состоятельность концепции. Установлено, что для обеспечения выкачивания расплава по наклонному каналу необходимо создать линейную токовую нагрузку $1,4 \div 1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ с применением форсированного жидкостного охлаждения катушек;

5. Подтверждена удовлетворительная сходимость результатов численного моделирования и физического эксперимента. Для опытного образца ЛИМ62 с жидкометаллическим рабочим телом погрешность составила не более 25%. А для опытно-промышленного образца ЛИМ200 – не более 18,5%. Для повышения точности численной модели предложено усилить дискретизацию элементов конструкции ЭМЛ и проводить учет нелинейных свойств материалов;

6. Предложен алгоритм для расчета несимметричных трехфазных схем замещения на основе моделей взаимных индуктивностей, который позволяет учесть топологию расположения катушек на ярме магнитопровода и схему их коммутаций. Экспериментальные исследования на физической модели ЛИМ62 подтвердили эффективность метода. Расхождения моделирования и эксперимента не превысили 7,2%;

7. Получены зависимости интегральных и дифференциальных характеристик системы «индуктор-канал», которые позволили дать рекомендации для выбора коммутаций катушек и схем электропитания. Для взаимного соединения катушек следует использовать схему AZBXCY, которая на 35% потребляет меньше мощности, чем AAYYCC. А для электропитания от стандартных ПЧ следует использовать схему «треугольник». Схему «звезда с нейтральным проводом» можно применять только со специализированными ПЧ (отдельные силовые блоки для каждой фазы, объединенные в общую систему управления).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Горемыкин В.А. Математическое моделирование плоской линейной индукционной машины с увеличенным рабочим зазором / Е. А. Головенко., М. В. Первухин, В. Ф. Фролов, В. Ю. Неверов, **В. А. Горемыкин** // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. № 8. С. 21 – 25 (0,3 п.л./0,06 п.л.).

2. Горемыкин В.А. Повышение технико-экономических показателей индукционных установок сквозного нагрева цветных металлов с использованием параметрической оптимизации / С. С. Бежитский, Е. А. Головенко, **В. А. Горемыкин**, Е. С. Кинев, Д. В. Хохлов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2010. № 6. С. 19 – 24 (0,4 п.л./0,08 п.л.).

3. Горемыкин В.А. О решении задачи оптимального выбора параметров питания линейной индукционной машины генетическим алгоритмом с локальным поиском / С. С. Бежитский, Е. А. Головенко, **В. А. Горемыкин**, М. В. Первухин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2010. № 4. С. 23 – 27 (0,3 п.л./0,08 п.л.).

4. **Goremykin V. A.** Numerical simulation of the peration modes of the cylindrical MHD-pump for dispensing molten aluminum from the stationary mixer / Е. А. Golovenko, Е. А. Pavlov, V. V. Kovalsky, **V. A. Goremykin**, A. A. Avdulov, Y. S. Avdulova // Journal Magnetohydrodynamics. 2011. № 1. С. 105 – 114 (0,6 п.л./0,1 п.л.).

5. Горемыкин В.А. Математическое и физическое моделирование плоских двухсторонних линейных индукционных машин металлургического назначения / В. П. Рубцов, М. В. Первухин, Е. А. Головенко, Т. А. Боякова, **В. А. Горемыкин** // Вестник Московского энергетического института. 2011. №4. – С. 63 – 68 (0,4 п.л./0,08 п.л.).

6. Горемыкин В.А. Физическое моделирование линейных индукционных машин металлургического назначения / Е. А. Головенко, В. Н. Тимофеев, **В. А. Горемыкин**, Т. А. Боякова, А. А. Авдулов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева 2011, №7. – С. 91 – 94 (0,25 п.л./0,05 п.л.).

7. Горемыкин В.А. Критерии выбора конструктивных решений оптимальных малополюсных линейных индукционных машин / Е. А. Головенко, **В. А. Горемыкин**, Е. С. Кинев, И. С. Гудков, С. С. Бежитский // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева 2013, №1. – С. 142 – 146 (0,3 п.л./0,06 п.л.).

8. Индукционный нагреватель цилиндрических алюминиевых заготовок / Е.А. Головенко, **В.А. Горемыкин**, Е.С. Кинев, К.А. Михайлов // Индукционный нагрев. 2013, № 4. – С.105 – 115 (0,7 п.л./0,2 п.л.).

9. Горемыкин В.А. Технология электромагнитного воздействия на расплав алюминия в печах и миксерах / Е.А. Головенко, **В.А. Горемыкин**, Е.С. Кинев, А.С. Хроник, Д.В. Хохлов // Цветные металлы. 2014. № 2. С. 86 – 92 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

10. Горемыкин В.А. Параметрический синтез оптимальных конструкций индукционных нагревателей с многослойными обмотками / Е. С. Кинев, Е. А. Головенко, В.А. Горемыкин, И. С. Гудков, С. С. Бежитский // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева 2013, №2. – С. 182 – 188 (0,4 п.л./0,09 п.л.).

Патенты:

11. Пат. RUS 112569. Отъемная индукционная единица / Е. А. Головенко, **В. А. Горемыкин**, К. А. Михайлов, Д. В. Хохлов. Заявл. 29.07.2011.

12. Пат. RUS 114258. Отъемная индукционная единица / Е. А. Головенко, **В. А. Горемыкин**, Н. П. Маракушин, Д. В. Хохлов. Заявл. 29.07.2011.

Прочие публикации:

13. Горемыкин В.А. Исследование магнитных свойств ферромагнитных материалов в лабораторной установке / **Горемыкин В.А.**, Авдулов А.А. Хохлов Д.В. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сб. науч. тр. VХ Ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ. – М., 2009. – С. 64–65 (0,1 п.л./0,04 п.л.).

14. Горемыкин В.А. Математическое моделирование электромагнитного поля в цилиндрической линейной индукционной машине / Ковальский В.В. Хохлов Д.В., **Горемыкин В.А.** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сб. науч. тр. VХ Ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов МЭИ – М., 2009. – С.156–157 (0,1 п.л./0,04 п.л.).

15. Горемыкин В.А. Автоматизированный комплекс для измерения свойств ферромагнитных материалов / **Горемыкин В.А.**, Авдулов А. А., Хацаюк М. Ю. // Современные техника и технологии: сб. науч. тр. XV международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых: – Томск, 2009. – С.30–32 (0,2 п.л./0,06 п.л.).

16. Горемыкин В.А. Результаты физического моделирования плоских двухсторонних МГД-насосов / **Горемыкин В.А.**, Федоров В. Н., Фролов В.Ф. // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: сб. науч. тр. IV научно-технической конференция с международным участием – Новосибирск, 2009. – С.266–271 (0,4 п.л./0,1 п.л.).

17. Горемыкин В.А. Математическое и физическое моделирование линейных индукционных машин металлургического назначения / **Горемыкин В.А.**, Авдулов А. А., Хацаюк М. Ю. // Молодежь и наука: сб. науч. тр. VI Всероссийской научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых – Красноярск, 2010 – С. 145-149 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

18. Горемыкин В.А. Имитационное математическое моделирование линейных индукционных машин средствами пакета ANSYS Multiphysics / Бежитский С.С., **Горемыкин В.А.** // Интеллектуальные системы (AIS'10): сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции – М., 2010 – С. 142-143 (0,1 п.л./0,05 п.л.).

19. Горемыкин В.А. Серия энергоэффективных линейных индукционных машин для силового воздействия на расплавы металлов / Тимофеев В.Н., Головенко Е.А., **Горемыкин В.А.**, Гудков И.С., Хроник А.С. // Цветные металлы – 2011: сб. науч. тр. III Международного конгресса – Красноярск, 2011 – С. 642-629 (0,5 п.л./0,1 п.л.).

20. Горемыкин В.А. Технология электромагнитного воздействия на расплав алюминия в миксерах и печах / Головенко Е.А., Саламатов Ю.П., **Горемыкин В.А.**, Хацаюк М.Ю., Кинев Е.С., Хроник А.С. // Алюминий-21/РЕЦИКЛИНГ: сб. науч. тр. VI Международной конференции и выставки – М., 2013 – С. 120-129 (0,6 п.л./0,1 п.л.).

Подписано в печать 04.12.2016
Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 1.1
Тираж 100 экз. Заказ № 2254
Отпечатано в типографии БИК СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а