

На правах рукописи



Неверов Владимир Юрьевич

**ПЛОСКИЕ ОДНОСТОРОННИЕ ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ
МАШИНЫ С УВЕЛИЧЕННЫМ РАБОЧИМ ЗАЗОРОМ**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2010

Работа выполнена в научно-инновационном центре “Электротехнологии в металлургии” кафедры “Электротехнологии и электротехника” Политехнического института Сибирского федерального университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук
Головенко Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Иванчура Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент
Попов Юрий Николаевич

Ведущая организация ООО “НПЦ Магнитной гидродинамики”,
г. Красноярск

Защита состоится “29” сентября 2010 года в 16:00 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, корпус “А”, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 274.

Автореферат разослан “29” августа 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Т.М. Чупак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ

Актуальность работы. Основной областью применения плоских односторонних линейных индукционных машин (ЛИМ) с увеличенным рабочим зазором является металлургия. В металлургии ЛИМ используют для бесконтактного силового воздействия на расплавы металлов с целью их транспортировки, управления скоростью литья металла из миксеров и печей в кристаллизаторы, перемешивания с целью гомогенизации расплавов по химическому составу, температуре и других технических операций.

Металлургическое назначение ЛИМ определяет большую величину зазора между индуктором и рабочим телом, что вызвано необходимостью размещения между ними теплоизоляции. Большие рабочие зазоры приводят к существенным конструктивным особенностям ЛИМ. В частности плоские ЛИМ металлургического назначения, из-за большого рабочего зазора имеют большие абсолютные величины полюсных шагов и как следствие малое число пар полюсов. Это в свою очередь вызывает значительные проявления поперечного и продольного краевых эффектов в рабочем теле, а также сильное влияние эффекта переноса мощности между фазами на работу машины, при этом величина пульсирующего магнитного поля сопоставима с величиной бегущего магнитного поля. Все перечисленное предъявляет особые требования к разработке и проектированию ЛИМ металлургического назначения.

Проектирование любой электрической машины, и ЛИМ, в частности, включает в себя выбор материалов отдельных частей машины, выбор и расчет конструктивных параметров элементов конструкции машины, объединение их в конструктивные узлы и общую компоновку всех частей таким образом, чтобы машина, по возможности, наилучшим образом соответствовала своему назначению и была наиболее экономичной в работе и при изготовлении. Проектирование специальных или уникальных электрических машин представляет собой сложную научно-техническую задачу. Для ее разрешения требуются глубокие теоретические знания, большой объем опытных данных и достаточно подробные сведения о назначении машины и условиях, в которых она будет работать. Таким образом, при проектировании электрической машины приходится учитывать большое количество факторов, от которых зависят ее эксплуатационные свойства, заводская себестоимость изготовления и надежность в работе. При создании принципиально новых конструкций электрических машин, например, плоских ЛИМ специального назначения, оптимальный или близкий к нему вариант проекта необходимо создавать путем расчета и сопоставления многих вариантов. Этим они принципиально отличаются от широко распространенных вращающихся электрических машин, при создании которых в короткие сроки и при сравнительно небольших затратах труда удается довольно близко подойти к оптимальному варианту, так как их проектирование строится на основе большого опыта построения, длительной эксплуатации, глубоких теоретических и экспериментальных исследований происходящих в них процессов.

Использование классических инженерных методик расчета плоских односторонних ЛИМ с увеличенным рабочим зазором, основанных на аналитических выражениях, приводит к существенным погрешностям расчета (свыше 50%). Как следствие, существующие сегодня плоские односторонние ЛИМ с увеличенным рабочим зазором далеки от оптимального варианта с

точки зрения проектирования и энергетической эффективности. Поэтому с появлением современных программных продуктов для численного моделирования и параметрической оптимизации, а также средств автоматизированных натурных исследований физических моделей и промышленных образцов, у исследователей появились новые инструменты, которые позволяют провести достоверные расчеты и сопоставление многих вариантов конструкций плоских ЛИМ, накопить необходимый опыт и разработать рекомендации по созданию специальных машин с наиболее близкой к оптимальной конструкцией, применительно к условиям эксплуатации в литейных производствах металлургических предприятий.

Исследования по диссертации проводились в рамках гранта на фундаментальную НИР по проекту № 2.1.2/3995 и индивидуального гранта Фонда науки для молодых ученых № 18G081.

Объект исследования – индукционная система “индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело” (с увеличенным рабочим зазором) в применении к индукционным магнитогидродинамическим машинам металлургического назначения.

Предмет исследования – процессы, протекающие в индукционной системе «индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело» (с увеличенным рабочим зазором) и влияние конструктивных параметров ЛИМ и параметров электрического питания на эффективность преобразования электрической энергии в механическую.

Цель диссертации: развитие методов и средств численного анализа электромагнитного поля (ЭМП) в индукционной системе “индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело” (с увеличенным рабочим зазором) для различных вариантов исполнения токоведущих частей индуктора, как теоретической методологической основы проектирования ЛИМ металлургического назначения.

Для достижения цели в работе **решаются следующие задачи:**

1. Анализ опыта разработки и эксплуатации плоских односторонних ЛИМ, формализация и обоснование критериев оптимизации конструктивных параметров ЛИМ, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства и надежность при ограничениях на стоимость ее изготовления и эксплуатации.

2. Разработка универсальной математической модели плоской односторонней ЛИМ и алгоритмов расчета, параметрической оптимизации и сопоставление различных вариантов конструктивного исполнения ЛИМ с учетом принятых критериев оптимизации.

3. Подтверждение адекватности математических моделей путем сравнения результатов численного моделирования с данными натурального эксперимента на физических моделях и промышленных образцах.

4. Проведение численного математического моделирования для определения характеристик различных конструктивных исполнений ЛИМ и параметрическая оптимизация наиболее эффективных машин.

5. Разработка рекомендаций по совершенствованию используемых в промышленности ЛИМ металлургического назначения.

Методы исследования. Для решения задачи анализа электромагнитного поля в индукционной системе “индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело” (с увеличенным рабочим зазором) в работе использован численный метод конечных элементов (МКЭ) (с использованием имеющегося в

наличии лицензионного пакета программ ANSYS, академическая лицензия СФУ 00144095). Исследование процессов в плоских односторонних ЛИМ проводилось на базе методов теоретических основ электротехники, электрических машин, теории электромагнитного поля и математического анализа. При обработке результатов экспериментальных исследований использовались методы статистики и автоматизированных исследований физических величин с помощью набора инструментов фирмы National Instruments.

Научная новизна результатов диссертации заключается в следующем:

– разработана универсальная математическая модель для анализа, сопоставления и оптимизации параметров различных конструктивных исполнений ЛИМ, которая позволяет по основным конструктивным размерам индуктора в автоматизированном формате создать расчетную модель, задать свойства элементов и источников ЭМП в расчетной области, построить конечно-элементную сетку, провести расчеты и получить результаты в максимально удобном для исследователя виде с целью последующего использования при проектировании ЛИМ;

– выявлены ключевые конструктивные параметры индукционной системы, определяющие физические процессы в индукционной системе “индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело” (с увеличенным рабочим зазором), а также критерии сопоставления ЛИМ различных исполнений в зависимости от назначения и условий эксплуатации плоской ЛИМ с увеличенным рабочим зазором;

– определены зависимости электромагнитного напора, действующего на рабочее тело, от главных геометрических характеристик ЛИМ для различных конструкций, позволяющие разработать рекомендации по совершенствованию ЛИМ металлургического назначения.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

– создана программа и разработаны алгоритмы, которые могут быть использованы для анализа аналогичных индукционных систем более широкого назначения и условий эксплуатации;

– даны рекомендации по разработке новых и совершенствованию известных индукционных устройств металлургического и общего назначения, позволяющие повысить энергетическую эффективность, технологичность и эксплуатационную безопасность рассматриваемых устройств за счет применения при различных рабочих зазорах определенных вариантов исполнения токоведущих частей и геометрических размеров индуктора ЛИМ;

– разработаны проекты оптимизированных по конструктивному исполнению плоских ЛИМ, обеспечивающих их эффективную работу при зазорах 300, 500 и 700 мм.

Достоверность полученных результатов подтверждена приемлемым совпадением результатов вычислительного эксперимента (с использованием разработанных математических моделей) с результатами натурального эксперимента на физических моделях и опытно-промышленных образцах.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы реализованы в рамках х/д тем №№ 20090, 468у, 1653/09 и в учебном процессе кафедры “Электротехнологии и электротехника” Политехнического института Сибирского федерального университета, дипломном проектировании студентов.

На защиту выносятся:

1. Универсальная математическая модель и алгоритм расчета электромагнитных процессов в плоской односторонней ЛИМ с увеличенным рабочим зазором.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований плоских ЛИМ с увеличенным рабочим зазором, сопоставления машин различных конструктивных исполнений.

3. Рекомендации по проектированию и эксплуатации плоских ЛИМ металлургического назначения.

Апробация работы. Основные научные и технические результаты были представлены на: всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодежь и наука: начало XXI века”, посвященной 50-летию КГТУ (Красноярск, 2006); всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Молодежь и наука: начало XXI века”, (Красноярск, 2007); XIV Международной научно-практической конференций студентов и молодых ученых “Современные техника и технологии” Томского политехнического университета (Томск, 2008); пятнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” Московского энергетического института (технического университета) (Москва, 2009), четвертой научно-технической конференции с международным участием “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, 2009).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 11 печатных работах, в том числе 2 в изданиях из перечня ВАК.

Личный вклад автора. Разработка математических моделей, алгоритмов и программ, проведение вычислительных процессов, организация и проведение экспериментальных исследований выполнено автором самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 110 наименований и 2 приложений. Основная часть работы изложена на 135 страницах, содержит 15 таблиц и 66 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверность полученных результатов.

В первом разделе представлен анализ различных конструкций плоских односторонних ЛИМ, особенности их проектирования и современное состояние методов и средств научных исследований и инженерных методик проектирования ЛИМ, а также обоснованы направления дальнейших исследований, позволяющих добиться целей диссертационной работы.

Основной областью применения плоских односторонних ЛИМ с увеличенным рабочим зазором является металлургия. В металлургии ЛИМ применяются для бесконтактного силового воздействия на расплавы металлов

для транспортировки, перемешивания с целью получения равномерности температуры и химического состава в объеме расплава или выкачивания из стационарного миксера в литейную машину. Индуктор плоской односторонней ЛИМ (рисунок 1) состоит из ферромагнитного сердечника 1 и многофазной обмотки 2, расположенной в пазах на поверхности сердечника. Создаваемое плоской ЛИМ бегущее магнитное поле пронизывает рабочее тело 3 и оказывает на него силовое воздействие, вследствие чего рабочее тело движется со скоростью V_M .

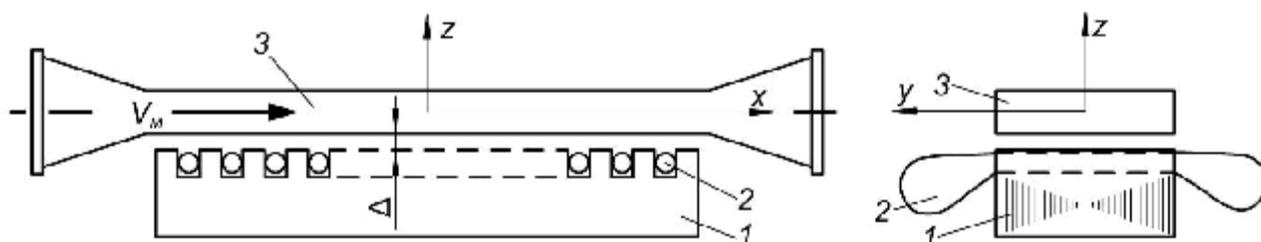


Рис. 1

В связи с большим рабочим зазором Δ между сердечником и рабочим телом, и, как следствие, значительным ослаблением магнитного потока в плоских ЛИМ металлургического назначения линейная токовая нагрузка обмоток значительно выше, чем в электрических машинах с вращающимся ротором. Вместе с тем величина плотности тока существенно ограничена вследствие сложных условий охлаждения токоведущих частей обмоток. Поэтому приходится применять большую площадь паза, что влечет за собой повышение пазового рассеяния. В плоских ЛИМ металлургического назначения рабочий поток на активной поверхности магнитопровода сопоставим по величине с потоком пазового рассеяния. Кроме этого большая величина рабочего зазора приводит к необходимости использования больших величин полюсного шага и как следствию малому числу полюсов. Из-за малого числа полюсов в машинах с разомкнутым магнитопроводом наблюдается существенное перераспределение мощности между обмотками разных фаз, то есть взаимному влиянию обмоток разных фаз. Все эти факторы приводят к существенным особенностям плоских ЛИМ по сравнению с вращающимися машинами, но зато существенно сокращают число вариантов их исполнения.

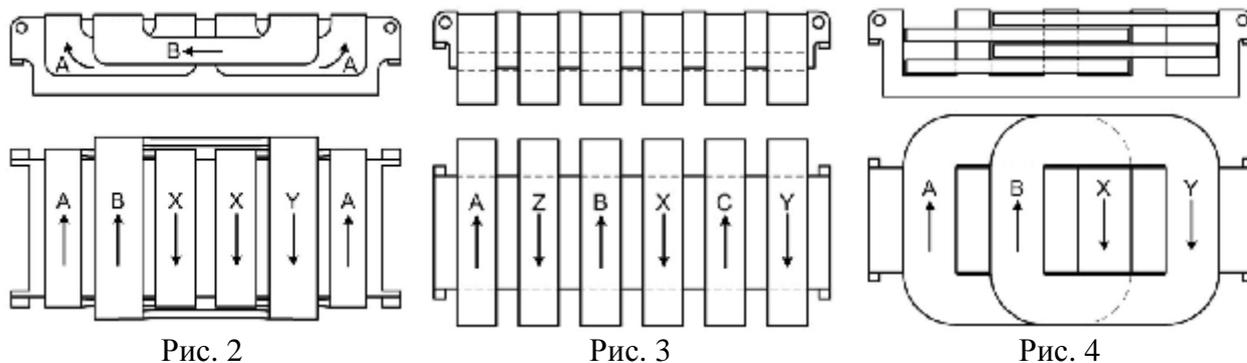
Для нужд МГД перемешивания расплава плоские ЛИМ на протяжении более пятидесяти лет шведско-германским концерном АВВ используется конструкция индуктора ЛИМ с расщепленной фазой, которая имеет двухфазную обмотку с одной полюсной парой на длину машины $2r = 2$ (рисунок 2).

Аналогичные конструкции для перемешивания в сталеплавильных печах в СССР поставляла «Электросила» (г. Ленинград) под названием «Статор электромагнитного перемешивания» (СЭП 2). Существенными недостатками этих конструкций было водяное охлаждение токоведущих частей, дороговизна, высокая сложность и низкая надежность.

В СССР применялась также конструкция индуктора плоской ЛИМ, разработанная СКБ МГД при институте физики Латвийской АН с обмоткой барабанного типа, водяным охлаждением токоведущих частей и электропитанием на промышленной частоте в силу малой величины футеровки в месте

установки индуктора (рисунок 3), которая также показала себя ненадежной из-за частого выхода в ремонт и низкой эффективности.

Значительно более перспективной оказалась конструкция индуктора плоской ЛИМ с перекрещивающимися обмоткам (рисунок 4), разработанная под руководством профессора В. Н. Тимофеева (а.с. №1697577) в Красноярском государственном техническом университете. Очевидным преимуществом этого индуктора ЛИМ стало воздушное охлаждение токоведущих частей, что достаточно высоко оценили металлурги.



Как следствие, такие индуктора ЛИМ получили широкое распространение как в России, так и за рубежом. Однако, эти индукторы ЛИМ также имеют существенные недостатки. При единичном обмоточном коэффициенте ($k_{об} = 1$) обмотка имеет коэффициент заполнения паза медью не более 0,2 и может быть использована только в двухфазном исполнении, что требует использования специального источника питания. Данная конструкция в работе условно названа ЛИМ 1 (рисунок 5).

Опыт проектирования плоских ЛИМ показал, что наиболее перспективными вариантами индукторов плоской ЛИМ являются индукторы ЛИМ с укороченным шагом обмотки, которые приведены на рисунке 5,б-г.

Вторая из исследованных машин (ЛИМ 2) – это индуктор ЛИМ с укороченным шагом обмотки, которая является частным случаем машины Шербиуса с четырьмя явно выраженными выступами на длину машины, двухфазной обмоткой с фазной зоной $\alpha = 90$ электрических градусов, относительным шагом $\beta = 1/2$, двумя парами полюсов $2p = 2$, числом пазов $Z = 4$ и обмоточным коэффициентом $k_{об} = 0,707$ (рисунок 5,б).

Но с точки зрения перспективы развития плоских ЛИМ наиболее интересными стали индуктора ЛИМ с трехфазной укороченной обмоткой с тремя (рисунок 5,в) и с шестью (рисунок 5,г) явно выраженными полюсными выступами на длину машины, которые в работе обозначены соответственно ЛИМ 3 и ЛИМ 4, в силу использования трехфазной системы напряжения, а следовательно дешевых серийно выпускаемых источников питания.

Важной особенностью трехфазных ЛИМ с укороченным шагом обмотки является возможность их работы по различным схемам включения. Например, ЛИМ 3, которая представляет собой частный случай машины Шербиуса с тремя явно выраженными выступами (рисунок 5,в), может быть включена по схеме АВС (в обозначениях векторно-топографической диаграммы) и АУС. В первом случае схема будет иметь параметры: $\alpha = 120$ электрических градусов, $\beta = 2/3$, $2p = 2$, $k_{об} = 0,985$.

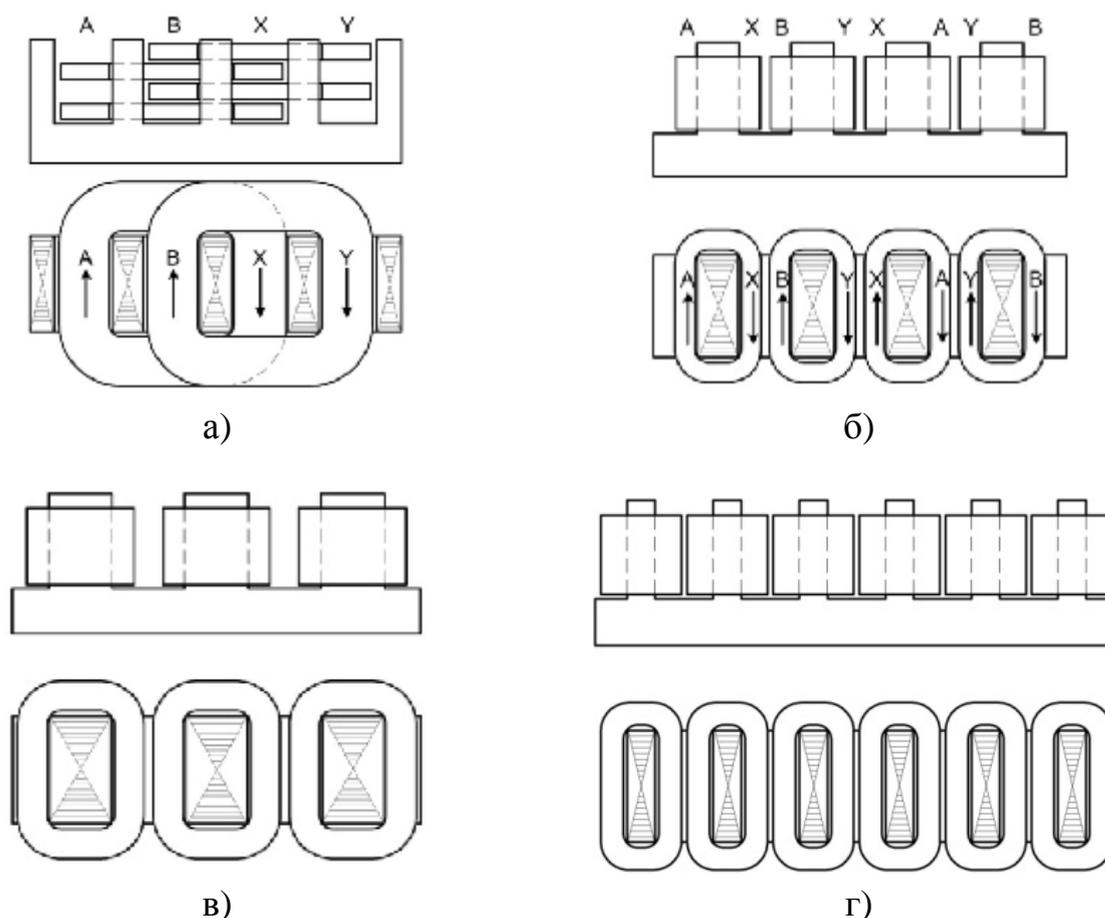


Рис. 5

При включении по схеме АУС машина приобретает параметры: $\alpha = 60$ электрических градусов, $\beta = 1/3$, $2p = 1$ и $k_{об} = 0,342$. Инвертирование средней катушки обмотки ЛИМ 3 кардинально меняет параметры машины, что выражается в почти трехкратном уменьшении обмоточного коэффициента, но при этом меняется и полюсный шаг, что значительно уменьшает скорость ослабления бегущего магнитного поля в рабочем зазоре и весьма полезно на больших рабочих зазорах.

ЛИМ 4 представляет собой в явном виде машину Шербиуса с шестью явно выраженными выступами и имеет уже четыре схемы включения:

- AZVXCY ($\alpha = 60^0$, $\beta = 1/3$, $2p = 2$, $k_{об} = 0,342$);
- AABVCC ($\alpha = 120^0$, $\beta = 1/3$, $2p = 2$, $k_{об} = 0,557$);
- AAUYCC ($\alpha = 60^0$, $\beta = 1/6$, $2p = 1$, $k_{об} = 0,168$);
- ABCABC ($\alpha = 120^0$, $\beta = 2/3$, $2p = 4$, $k_{об} = 0,985$).

Практика проектирования и последующие экспериментальные исследования ЛИМ показали, что инженерные методики расчета ЛИМ, построенные на базе исследований А.И. Вольдека, Х.И. Янеса и других выдающихся ученых, при учете процессов протекающих в машине, и при различных схемах включения и дают погрешность от 20% до 80%. Это вызвано тем, что, несмотря на существенные отличия плоских односторонних ЛИМ с увеличенным рабочим зазором от вращающихся электрических машин, для их расчета применяют инженерные методики из теории асинхронных двигателей, адаптированные с помощью коэффициентов, полученных различными исследова-

дователями на основе аналитических выражений с существенными допущениями. Математические модели на базе численных методов, развитые в работах В. Н. Тимофеева, Р. М. Христинича и Ф. Н. Сарапулова также не отражают сложности всех процессов в ЛИМ, особенно при существенной несимметрии в магнитной и электрической цепях машины. Работы Е. А. Павлова позволили исследовать МГД течения при использовании ЛИМ, но в виду сложности и как следствие низкой производительности математические модели оказались не пригодны для исследования десятков вариантов исполнения и применения в оптимизационных алгоритмах с несколькими варьируемыми параметрами. Поэтому перед автором поставлена цель развития универсальной математической модели, которая бы достоверно учитывала электромагнитные процессы в плоских ЛИМ с учетом всех описанных выше особенностей плоских односторонних ЛИМ с увеличенным рабочим зазором и при этом была приемлема к использованию в оптимизационных алгоритмах.

Во втором разделе представлена разработанная универсальная математическая модель для анализа ЭМП в индукционной системе “индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело” (с увеличенным рабочим зазором).

Универсальность математической модели заключается в том, что алгоритм построения расчетной области предполагает выбор типа обмотки ЛИМ, задание основных параметров и автоматизированное задание параметров расчетной области, параметров системы электропитания, то есть выбор источника тока или источника напряжения, свойств элементов внутри расчетной области, построение сетки конечных элементов. Разработанная модель является параметрической и позволяет использовать ее в оптимизационных алгоритмах.

Отработка математической модели проводилась на ЛИМ с трехфазной укороченной обмоткой и с тремя явно выраженными полюсными выступами на длину машины, то есть ЛИМ 3 (рисунок 6), где 1 – спинка магнитопровода, 2 – зубец магнитопровода, 3 – обмотка индуктора, 4 – рабочее тело (алюминиевая пластина).

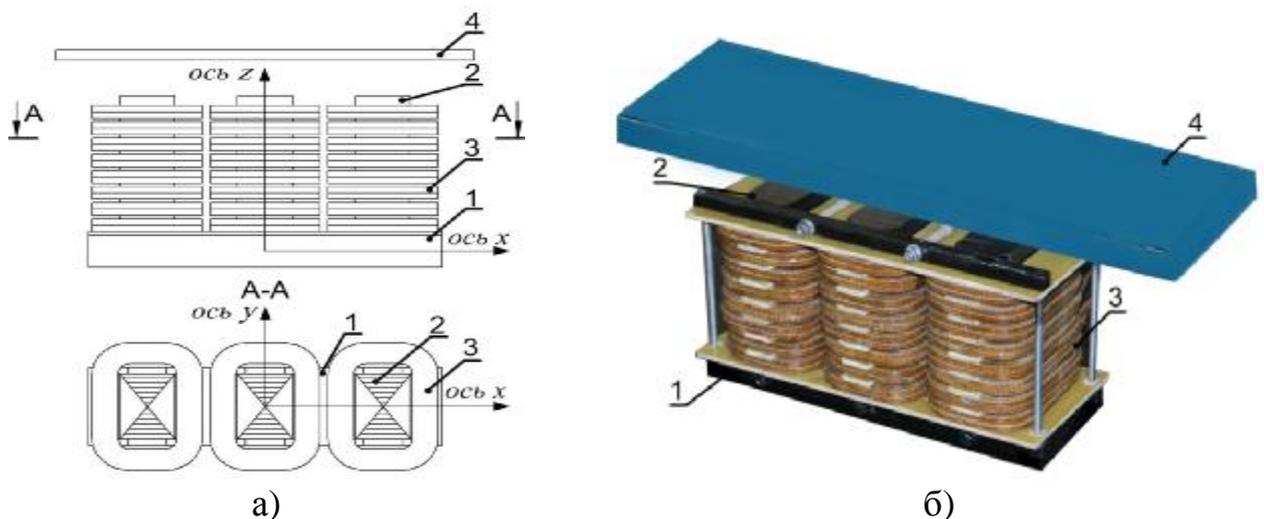


Рис. 6

Построение геометрии и задание параметров модели, а также расчет задачи производился в программном комплексе ANSYS Multiphysics.

Ввиду сложности учета всех деталей реальной геометрии конструкции, свойств материалов и ограниченности вычислительных возможностей для решения 3-х мерной электромагнитной задачи используются допущения приведенные ниже:

1. Не учитываются влияние шпилек и крепежа индуктора на ЭМП в расчетной области, которые практически не влияют на работу ЛИМ, но при их учете требующие значительное повышение времени расчетов.
2. Токами смещения, ввиду их незначительности, пренебрегаем.
3. Учет свойств электротехнического железа магнитопровода производится путем задания удельного электрического сопротивления стали $\rho_y = 1 \cdot 10^6$ Ом·м по нормали к листам и $\rho_x = \rho_z = 1 \cdot 10^6$ Ом·м в плоскости листа.
4. Магнитная проницаемость магнитопровода принята $m_x = m_y = m_z = 1000$, то есть кривая намагничивания стали не задается в силу незначительности влияния на результат математического моделирования.
5. В катушках ЛИМ вместо отдельных проводников задаются эквивалентные сплошные массивные проводники с равномерным распределением тока по сечению.
6. Границы расчетной области задаются параллелепипедом на расстоянии $2t$ во всех направлениях от крайней точки любого конструктивного элемента и считается, что электромагнитное поле (ЭМП) на этих границах полностью затухает.

Общий вид расчетной модели в изометрии представлен на рисунке 7, на котором показаны сердечник 1, обмотки 2, твердо-металлическая пластина 3 и непроводящая, немагнитная область внешнего пространства (4) расчетной модели по центру в плоскостях XZ, YZ, XY и представлены соответственно на рисунках 7,б, 7,б, 7,в.

Электромагнитное поле в расчетной области описывается системой уравнений Максвелла и материальными уравнениями. Решение уравнений в комплексе программ ANSYS выполнено относительно векторного магнитного потенциала:

$$\text{rot } \bar{A} = \bar{B} \quad (1)$$

$$\Delta \bar{A} - \frac{m}{r} \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{m}{r} [\bar{V} \times \text{rot } \bar{A}] = 0 \quad (2)$$

где \bar{A} – векторный магнитный потенциал; m – магнитная постоянная; \bar{V} – вектор скорости движения рабочего тела.

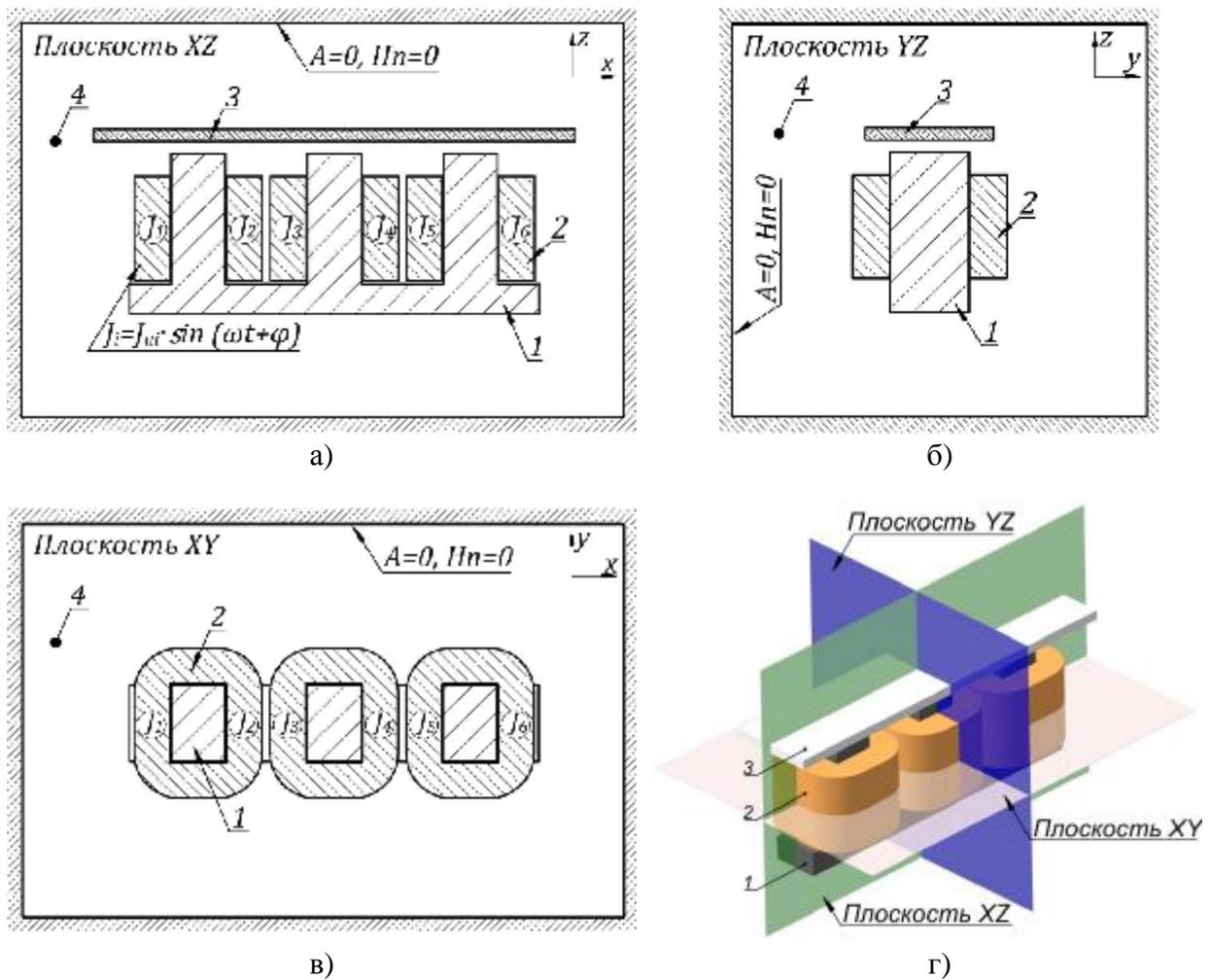


Рис. 7

Для однозначного решения уравнений (1) и (2) по всей области задаются краевые условия в соответствии с допущением б, нулевые начальные условия (для векторного магнитного потенциала и скорости движения рабочего тела) и токовые нагрузки в обмотках в соответствии с задаваемой электрической схемой включения текущего расчета.

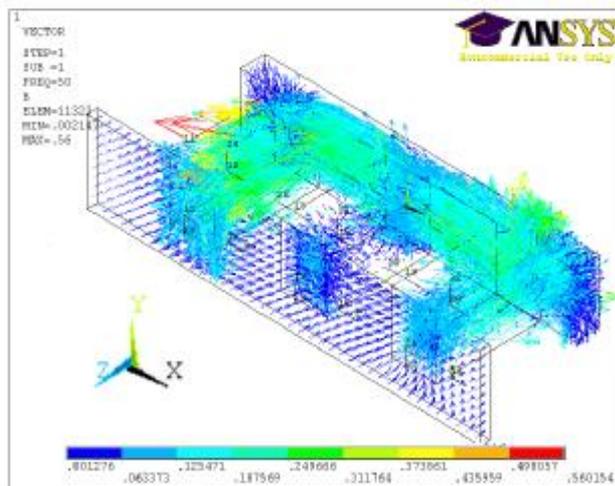


Рис. 8

С помощью разработанной математической модели были получены дифференциальные характеристики, такие как распределение усилия в рабочем теле при различных рабочих зазорах и распределение магнитной индукции в индукционной системе “индуктор плоской односторонней ЛИМ – рабочее тело” (с увеличенным рабочим зазором) (рисунок 8).

При анализе работы ЛИМ важным параметром является интегральная сила, возникающая во вторичном элементе.

Например, на рисунке 9 представлены графики тангенциальной составляющей электромагнитной силы в зависимости от электрического сдвига фаз в соседних катушках при различной величине рабочего зазора и частоте питающего напряжения 50 Гц (а) и при разной частоте питающего напряжения для схемы с фазной зоной $\alpha = 60^\circ$ (б) в пусковом режиме. Кривая 1 проведена через максимумы характеристик на различных рабочих зазорах.

Из графиков видно, что фазная зона $\alpha = 60^\circ$ ближе к максимальной величине усилия для всех рабочих зазоров, чем $\alpha = 120^\circ$. Это значит, что во всем диапазоне зазоров схема с одним полюсным шагом на длину лучше, чем схема с двумя полюсными шагами на длину.

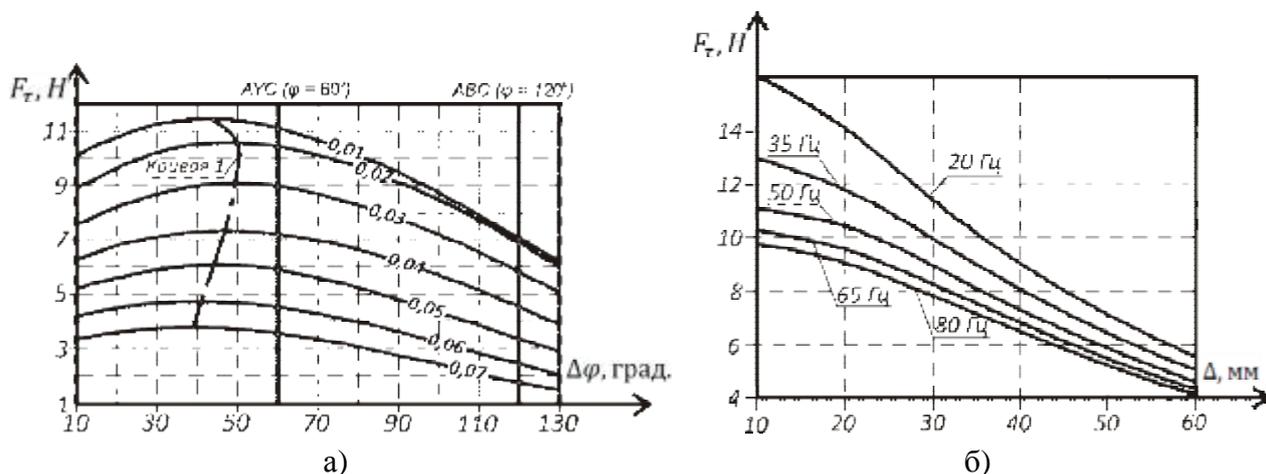


Рис. 9

Представленная во втором разделе математическая модель дает полное представление о процессах в любых плоских ЛИМ аналогичных конструкций, но для проверки достоверности полученных с ее помощью результатов осуществлено сравнение с данными натурных испытаний на физических моделях. Результаты сравнения приведены в третьем разделе.

В третьем разделе представлены результаты математического и физического моделирования ЛИМ 3 на три типоразмера (рисунок 10). Под типоразмером в данном случае понимается набор некоторых размерных характеристик, позволяющих изготавливать индуктора разной длины (мощности), но с одинаковой линейной токовой нагрузкой. Рассмотренные в этой главе индуктора имеют активную длину 220, 280 и 340 мм, что соответствует моделям ЛИМ 31, ЛИМ 32 и ЛИМ 33.

Установка для натурных исследований приведена на рисунке 11. Под действием электромагнитных сил, создаваемых индуктором 1 измерительная пластина 2 перемещалась на колесах с подшипниками по направляющей 3. Зазор между индуктором и пластиной менялся с помощью подкладки различного числа текстолитовых пластин 4 под измерительную пластину. На измерительной установке в автоматизированном режиме с помощью набора инструментов National Instruments проводились измерения мгновенных значений токов и напряжений в фазах ЛИМ, магнитной индукции в характерных точках магнитопровода (в ярме, у основания и коронок зубцов), силы, действующей на пластину.

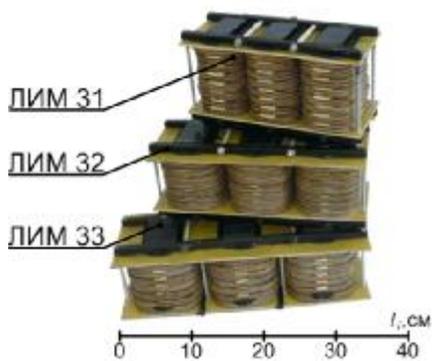


Рис. 10



Рис. 11

Полученные характеристики ЛИМ сопоставлялись с результатами математического моделирования, полученными с помощью разработанной универсальной модели. Попутно исследовалась работа конструкции ЛИМ 3 с различными полюсными шагами и величиной рабочего зазора, то есть исследована гипотеза предшествующих исследователей о целесообразности выбора полюсного шага и как следствие активной длины машины в зависимости от величины рабочего зазора.

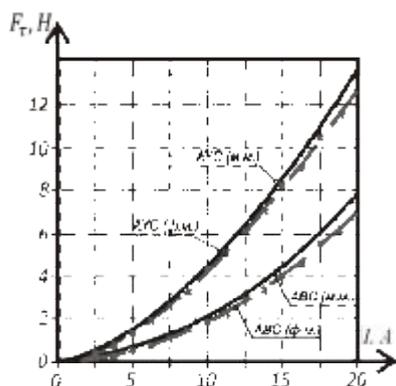


Рис. 12

На рисунке 12 показаны зависимости тангенциальной составляющей F_t от тока I для двух схем включения (АУС и АВС), полученные при помощи физического и математического моделирования ЛИМ 32

В процессе исследования были получены зависимости тангенциальной составляющей силы F_t от разности фаз $\Delta\varphi$ (рисунок 13) и на разных рабочих зазорах Δ (рисунок 14) для двух схем включения (АУС и АВС) и трех типоразмеров ЛИМ. Как видно из графиков, максимум усилия стоит на одной и той же фазной зоне (около 56 электрических градусов) для всех типоразмеров, но очевидно, что расходы на изготовление и эксплуатацию с увеличением типоразмера существенно возрастают. Это значит, что при выборе ЛИМ необходимо выбирать минимально возможный типоразмер исходя из условия обеспечения этой машиной электромагнитного напора заданного технологическими требованиями. При этом в ходе исследования определено, что для всех типоразмеров выявлены возможности увеличения электромагнитного напора за счет оптимизации конструкции. Описание работы предложенного оптимизационного алгоритма и результаты исследования приведены в 5 разделе диссертации.

Типоразмер ЛИМ необходимо выбирать исходя из эффективности машины и экономической целесообразности. На рисунке 15 изображена зависимость КПД от рабочего зазора при скольжении $s = 0,75$.

Из рисунка видно, что на малом зазоре применять стоит малую машину, а с увеличением зазора растет и эффективность большой машины по сравнению с остальными типоразмерами.

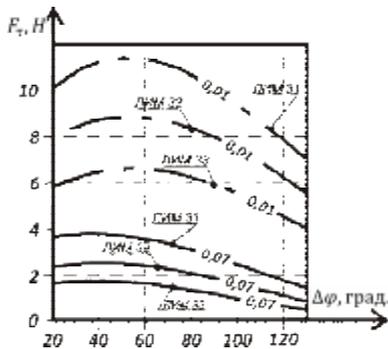


Рис. 13

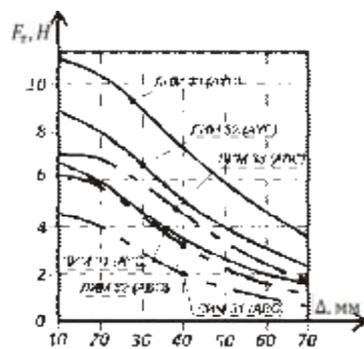


Рис. 14

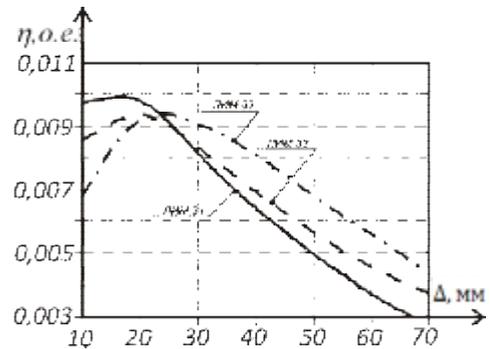


Рис. 15

Уже при зазорах свыше 40 мм очевидна необходимость применения ЛИМ 33, до 40 мм – ЛИМ 31. ЛИМ 32 может применяться лишь в том случае, если индуктор ЛИМ 33 не может быть использован по массогабаритным ограничениям, то есть в исключительных случаях.

При исследовании ЛИМ 3 подробно рассмотрен вопрос переноса мощности между обмотками разных фаз и влияние этого явления на эффективность машины. Этот вопрос также актуален с точки зрения выбора источника питания ЛИМ. Традиционно для питания малополюсных ЛИМ рекомендуется применение многофазных источников тока с поддержанием одинаковых по фазе амплитуд токов и заданного угла между этими токами. При этом очевидно, что бегущее магнитное поле ЛИМ будет наиболее правильным при симметрии магнитных потоков на коронках зубцов, то есть при симметрии магнитной цепи. При задании симметрии токов пазовое рассеяние и перенос мощности между фазами существенно снижают симметрию магнитной цепи.

На рисунке 16 приведена векторно-топографическая диаграмма ЛИМ 32 при токе $I = 20$ А. В качестве источника питания в данном случае использован автотрансформатор, то есть источник напряжения промышленной частоты (коэффициент несимметрии по напряжению $\alpha_U = 0$). Сдвиг фаз между токами φ_{12} и φ_{23} составляет 113° (коэффициент несимметрии по току $\alpha_I = 0,64$), а между магнитными потоками на коронках зубцов соответственно 121° (коэффициент несимметрии по магнитному потоку $\alpha_\Phi = 0,124$). Введение симметрии токов при использовании обратной связи по току приводит к показателям $\alpha_U = 0,34$, $\alpha_I = 0$, $\alpha_\Phi = 0,335$ и снижению электромагнитного напора на 15 %.

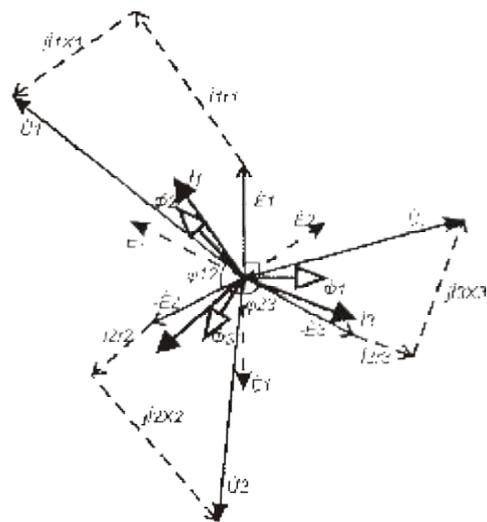


Рис. 16

При этом регулирование частоты питающего напряжения без симметрии токов может дать повышение эффективности на 25-40 % при выборе оптимальной частоты для рассматриваемого рабочего зазора. Таким образом, по результатам исследований для питания ЛИМ 3 рекомендовано использование тиристорных источников питания с регулированием частоты. Все исследования ЛИМ 3 показали достаточно близкое (в пределах 10%) совпадение всех физических величин при математических и натурных исследовани-

лах 25–40% в зависимости от типоразмера индуктора.

В результате исследований предложено использование машины Шербиуса с тремя явно выраженными выступами и схемой включения АУС для всех рабочих зазоров $0,05\tau \geq \Delta \geq 0,5\tau$.

В пятом разделе представлены результаты параметрической оптимизации различных конструктивных исполнений ЛИМ. В качестве критерия оптимизации выступало полезное тянущее усилие, создаваемое индуктором ЛИМ в рабочем теле при ограничениях на массогабаритные показатели. В качестве параметров оптимизации были приняты величины токов и сдвиги фаз между соседними обмотками, а также частота питающего напряжения, конструктивные параметры (зубцово-пазовые деления, число витков, секций обмотки и сечения витков).

При этом оптимизация реализована в два этапа. На первом этапе оптимизировалась конструкция ЛИМ на заданном рабочем зазоре и электромагнитном напоре. На втором этапе проводилась оптимизация параметров электрического питания ЛИМ. На первом этапе в качестве целевой функции выбрано уменьшение активной длины индуктора из чего следует снижение массогабаритных энергетических показателей ЛИМ, а на втором этапе – снижение мощности, потребляемой индуктором при заданном напоре.

В качестве объектов оптимизации выбраны МГД перемешиватели алюминия в миксерах и печах для трех характерных рабочих зазоров 300, 500 и 700 мм. Результаты оптимизации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение существующих и модернизированных ЛИМ для целей МГД перемешивания алюминия в миксерах и печах (при равной технологической эффективности)

Параметр, ед. изм.	Значение параметра					
	МГДП 2,5	ЛИМ 300	МГДП 3,0	ЛИМ 500	МГДП 3,5	ЛИМ 700
Величина рабочего зазора, мм	300 – 450	300 – 500	450 – 650	500 – 700	650 – 800	700 – 800
Количество фаз	2	3	2	3	2	3
Масса, кг	6500	4800	9200	7300	13700	11500
Длина, мм	2185	2100	2690	2400	3320	3200
Высота, мм	800	500	640	600	800	750
Ширина, мм	1200	700	1300	900	1900	1400
Максимальная амплитуда тока, А	330	180	500	220	700	300
Максимальная амплитуда напряжения, В	500	500	500	500	500	500
Частота питающего напряжения, Гц	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Потребляемая мощность, кВА	165	135	250	165	350	225
Коэффициент мощности	0,3	0,4	0,2	0,35	0,15	0,3

Из таблицы видно, что предложенные индуктора МГД перемешиватели существенно выигрывают по массогабаритным показателям (что важно при встраивании ЛИМ в сложные технологические линии и агрегаты) и выигрывают по энергетической эффективности. Кроме того, предлагаемые ЛИМ можно питать от серийно выпускаемых (и, соответственно, дешевых) частотно регулируемых тиристорных регуляторов.

Результаты исследований использованы в полном объеме при разработке МГД перемешивателя с рабочим зазором 700 мм, о чем свидетельствует акт о внедрении диссертационной работы от ООО “НПЦ Магнитной гидродинамики”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные достижения и результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Определены возможности повышения эффективности преобразования электрической энергии в механическую в плоской односторонней ЛИМ с увеличенным рабочим зазором. В частности, предложены наиболее перспективные конструкции плоских односторонних ЛИМ с укороченным шагом обмотки, имеющие три явно выраженных выступа на длину машины с питанием от стандартного трехфазного источника напряжения.

2. Разработаны универсальная математическая модель и алгоритм расчета, которые на базе коммерческого пакета программ ANSYS позволяет исследовать плоские ЛИМ различных конструктивных исполнений с учетом сложных электромагнитных процессов в индукционной системе машины и электрических процессов в системе ее электропитания. Модель позволяет выполнять автоматизированное задание конструкции ЛИМ, параметров электрического питания и условий ее использования, а также осуществлять параметрическую оптимизацию ЛИМ с помощью внешних оптимизационных алгоритмов.

3. Подтверждена адекватность универсальной математической модели путем сравнения с данными натурных экспериментов в лаборатории “Магнитной гидродинамики” ПИ СФУ и на промышленных образцах. Погрешности при определении электромагнитного усилия, создаваемого плоской ЛИМ, и энергетических параметров индуктора сокращены примерно в пять раз и для рассмотренных вариантах и не превысили 10%. Сопоставление данных по магнитным потокам в характерных сечениях магнитопровода индуктора ЛИМ дало погрешность в пределах 3%.

4. Определены параметры электрического питания различных конструкций плоских ЛИМ. В частности, с применением оптимизационных алгоритмов выявлено, что трехфазную конструкцию ЛИМ целесообразно питать от симметричного источника напряжения, так как варьирование величин токов по фазам и симметрирование магнитной цепи машины приводит к значительному увеличению электромагнитного усилия в отличие от любых двухфазных конструкций. Кроме того, использование серийно выпускаемых трехфазных источников питания для трехфазной ЛИМ делает ее более удобной и дешевой в эксплуатации. Электропитание двухфазной конструкции плоской ЛИМ необходимо осуществлять исходя из учета симметрирования магнитной цепи машины, что позволяет достичь повышения электромагнитного усилия, развиваемого ЛИМ, до 40%

5. Сформулированы рекомендации по выбору типоразмера ЛИМ в зависимости от величины рабочего зазора, а также их применению при различных ограничениях технической системы и технологического процесса. Разработаны МГД перемешиватели алюминия в миксерах и печах на рабочие зазоры 300, 500 и 700 мм.

6. Предложена система автоматизации симметрирования магнитной цепи индуктора за счет оптимального соотношения питающих напряжений фаз с использованием обратной связи через датчики магнитного потока на коронках зубцов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи по списку ВАК:

1. **Неверов В. Ю.** Модернизация индукционной системы с применением схемы смешанного резонанса. / Е. А. Головенко, М. В. Первухин, **В. Ю. Неверов**, Е. С. Кинев, А. В. Комаров // Вестник Воронежского государственного технического университета, том 5, №6, серия «Энергетика», гл. ред. В.Н. Фролов. Воронеж – ВГТУ, 2009г. – С. 177-181.
2. **В. Ю. Неверов** Математическое моделирование плоской линейной индукционной машины с увеличенным рабочим зазором. / Е. А. Головенко, М. В. Первухин, **В. Ю. Неверов**, В. А. Горемыкин, В. Ф. Фролов // Вестник Воронежского государственного технического университета, том 6, №10, гл. ред. В.Н. Фролов. Воронеж – ВГТУ, 2010г. – С. 21-25.

Прочие публикации:

3. **Неверов В. Ю.** Исследование эффективности магнитогидродинамического перемешивателя алюминиевых сплавов с помощью программного комплекса ELCUT. / С. А. Бояков, Т. А. Боякова, **В. Ю. Неверов**, В. Е. Тимошев // Вестник Красноярского государственного технического университета. Вып. 42 “Математические методы и моделирование”. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006 г. – С. 69-71.
4. **Неверов В. Ю.** Математическое моделирование МГД-установки для перемешивания алюминия в миксере / Т. А. Боякова, **В. Ю. Неверов** // Тез. всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006 г. – С. 249-250.
5. **Неверов В.Ю.** МГД-установка для автоматического управления расходом жидкого металла / **В. Ю. Неверов**, Д. В. Хохлов, В. В.Ковальский // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 1. – Красноярск: СФУ, 2007 г. – С. 241-243.
6. **Неверов В. Ю.** Разработка трехфазной магнитогидродинамической (МГД) установки для перемешивания алюминия в миксере. / В. В. Ковальский, **В. Ю. Неверов**, Д. В. Хохлов // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 1. – Красноярск: СФУ, 2007 г. – С. 250-252.
7. **Неверов В. Ю.** Математическое моделирование процесса индукционного нагрева цилиндрической загрузки / **В. Ю. Неверов**, Д. В. Хохлов В. В. Ковальский // Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 1. – Красноярск: СФУ, 2007 г. – С. 285-288.
8. **Неверов В. Ю.** Исследование магнитогидродинамического лотка с повышенной надежностью / **В. Ю. Неверов**, В. В. Ковальский, Д. В. Хохлов // XIV Международная научно-практическая конференция студентов и моло-

дых ученых «Современные техника и технологии» СТТ 2008. Томск – ТПУ, 2008 г. – С. 403-404.

9. **Неверов В.Ю.** Оптимизация параметров плоской линейной индукционной машины с жидкометаллическим рабочим телом. / **В. Ю. Неверов**, В. В. Ковальский, К. А. Михайлов // XV ежегодная международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов "РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА". Москва - МЭИ, 2009 г. – С. 165-166.

10. **Неверов В.Ю.** Результаты физического моделирования линейного МГД насоса для лоткового дозирования. / **В. Ю. Неверов**, Д. В. Хохлов, Г. В. Шадрин // Четвертая научно-техническая конференция с международным участием «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ». Новосибирск – НГТУ, 2009 г. – С. 272-275.

11. **Неверов В.Ю.** Разработка технологии нагрева цилиндрической загрузки из материала с высокой удельной электропроводностью в постоянном магнитном поле. / **В. Ю. Неверов**, К. А. Михайлов, А. А. Авдулов // Четвертая научно-техническая конференция с международным участием «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ». Новосибирск – НГТУ, 2009 г. – С. 163-164.

Подписано в печать 26.08.2010
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