

На правах рукописи

ТАРАСОВ ФЕДОР ЕВГЕНЬЕВИЧ

ИНДУКЦИОННЫЙ МГД-НАСОС С ОДНОПЛОСКОСТНОЙ
КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ ОБМОТКОЙ ИНДУКТОРА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ
МАГНИЯ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика
и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»/

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сарапулов Федор Никитич

Официальные оппоненты: **Рубцов Виктор Петрович**,
доктор технических наук, ФГБОУ ВПО
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ», профессор кафедры «Автоматизированных
электротехнологических установок и систем»;

Мошкин Владимир Иванович,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВПО
«Курганский государственный университет»,
заведующий кафедрой «Энергетики и технологии
металлов».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»,
г. Пермь.

Защита состоится «24» июня 2015 года, в 15:00 часов 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, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.285.03, д.т.н., доцент

Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Применение магнитогидродинамических (МГД) устройств в системе транспорта жидких металлов применяется достаточно давно. Существенный подъем в данной области наблюдался в период с начала 60-х годов. Это было связано с разработками в области ядерной энергетики. Примерно в то же время началось интенсивное внедрение МГД-техники в металлургию. В частности, получили распространение МГД-насосы и МГД-дрессели в системах транспорта жидкого металла. Часть разработок того времени работают и по сей день. Данные агрегаты работают в агрессивных средах и областях высоких температур, поэтому применение к ним традиционных технологий электромашиностроения представляет существенные трудности. Для увеличения эффективности и надежности разрабатываемых устройств необходимы новые материалы и технологии для изоляции обмоток, которые появились сравнительно недавно и не были доступны разработчикам.

Магнитогидродинамические насосы применяют для принудительной подачи магниевых сплавов по металлотрактору из ванны печи в разливочную машину (рисунок 1), это связано с тем, что магний обладает высокой химической активностью по отношению к кислороду. При достижении некоторой предельной температуры магний при взаимодействии с кислородом загорается.

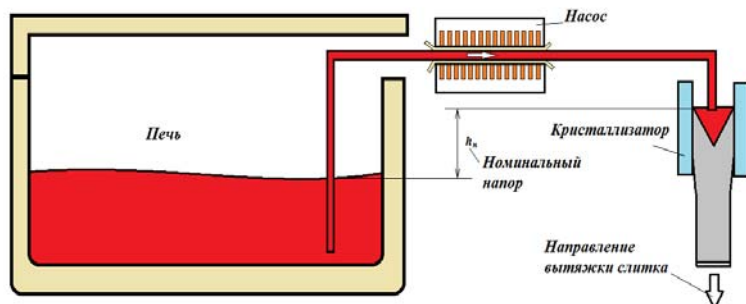


Рисунок 1 – Схема технологического процесса получения слитка магниевых сплавов, обусловлен разрушением теплоизоляции обмоток насоса с последующим перегоранием обмоток МГД-насоса.

Поскольку смена поврежденного насоса на исправный занимает определенное время, за которое поверхность полученного слитка успевает остыть, то продолжение заливки неизбежно приводит к возникновению дефектов литья. По этой причине при выходе из строя МГД-насоса заливка прекращается, а такой неполный слиток вынимается из машины и пускается в повторную переплавку.

Для решения данной проблемы встает вопрос разработки МГД-насосов с применением новейших материалов и современных методов обработки металла, способных привести к снижению стоимости производства и увеличению срока эксплуатации.

На сегодняшний момент появились современные тепло- и электроизоляционные материалы, способные выдерживать более высокие температуры, чем их аналоги на устаревших МГД-насосах. Появились современные методы обработки металлов при помощи лазерной резки, которые

Современное состояние производства магниевых сплавов с применением МГД-насосов характеризуется довольно высоким уровнем брака, обусловленного выходом из строя МГД-насоса в процессе отливки.

Выход насосов из строя, в большинстве случаев,

существенно снижают себестоимость производства штучных опытно-промышленных образцов. Появляется возможность изготовления обмоток непосредственно вырезанием из листа металла с применением технологии гидроабразивной резки, способствующая снижению расхода металла за счет уменьшения лобовых частей и простоте установки в магнитопровод.

Современным подходом к моделированию процессов в сложных взаимосвязанных системах является компьютерное моделирование. Этот подход позволяет существенно снизить затраты на изготовление опытных образцов проектируемых устройств, предсказать поведение системы в различных режимах и оптимизировать конструкцию проектируемого устройства, не прибегая к изготовлению прототипа.

Сложившейся тенденцией стало применение коммерческих пакетов компьютерного моделирования, использующих метод конечных элементов для решения широкого спектра взаимосвязанных задач. К таким компьютерным пакетам можно отнести используемые в настоящее время Comsol Multiphysics, Ansys. Для решения многих несложных задач можно использовать отечественный пакет Elcut. Эти пакеты позволяют в большинстве случаев производить моделирование сложных процессов в 2D и 3D постановках при минимальном количестве допущений.

При очевидных достоинствах такого подхода (высокая точность и достоверность вычислений, удовлетворительная скорость вычислений, при достаточно высокой производительности компьютерной техники и т.д.) можно отметить и существенные недостатки:

- использование универсальных компьютерных пакетов, таких как Ansys и Comsol, предполагает наличие достаточно высокой квалификации пользователей в области специальных разделов математики, что отсекает широкий круг возможных пользователей этих компьютерных пакетов;

- существенный рост времени вычисления при усложнении модели, например, при устранении допущений, связанных с нелинейными свойствами материалов, или добавлении связей между модулями расчета полей различной физической природы;

- высокая стоимость как самих пакетов, так и компьютерного оборудования, предназначенного для высокопроизводительных вычислений (суперкомпьютер).

Приведенные недостатки делают вышеназванные пакеты доступными в основном для крупных коллективов НИИ, или для фирм, специализирующихся на решении подобных задач.

Промежуточное положение между “тяжелыми” пакетами и инженерными методиками занимают методы приближенных вычислений, основанные на методе детализированных схем замещения.

Поэтому разработка универсальных методов компьютерного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в МГД-насосах, позволяющих находить оптимальные конструкции и режимы работы, является актуальной задачей.

Степень разработанности представленных результатов предусматривает научные основы исследования предлагаемых устройств с доведением до опытного образца МГД-насоса, устанавливаемого на участке отливки магниевых сплавов в ОАО “Каменск-Уральский металлургический завод”.

Объектом исследования является линейный индукционный магнитогидродинамический насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора для транспортировки магния.

Предмет исследования: электромагнитные и тепловые процессы в линейных индукционных МГД-насосах, схемы соединения обмоток индуктора, электро- и теплоизоляционные материалы катушек.

Цель работы: Разработка конструкций и методики расчета индукционных линейных МГД-насосов, а также научно обоснованных технических решений для изготовления надежной системы транспортирования жидкого магния с применением современных материалов и технологий.

Решаемые задачи:

1. Анализ существующих конструкций МГД-насосов, предназначенных для преобразования энергии электромагнитного поля в механическую энергию потока жидкого металла.

2. Создание методики расчета МГД-насосов, предназначенной для исследования электромагнитных и тепловых процессов на основе детализированных схем замещения (ДСЗ) и эквивалентных тепловых схем (ЭТС), доработка существующих моделей с учетом конструктивных и технологических особенностей МГД-насосов.

3. Исследование различных схем обмоток плоских линейных индукционных насосов (ПЛИН) а также обоснование выбора конструкции обмоток насоса.

4. Исследование наиболее выгодного соотношения размеров зубцово-пазовой зоны для определения оптимальной конструкции индуктора МГД-насоса с максимальным развиваемым усилием и максимальным использованием магнитного материала.

5. Обоснование выбора геометрических размеров машины с учетом максимума получаемого усилия на выбранной частоте источника питания.

6. Выбор частоты источника при фиксированных размерах индуктора и канала.

7. Создание и исследование промышленного образца МГД-насоса, сравнение полученных характеристик с результатами расчета.

8. Разработка практических рекомендаций для создания технологически совершенных обмоток ПЛИН с применением современных теплоизоляционных материалов и новейших способов обработки металлов.

Научная новизна заключается в следующем: 1. Разработана математическая модель плоского линейного МГД-насоса, созданная на основе метода детализированных схем замещения для исследования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в элементах насоса.

2. Обоснован выбор частоты источника питания при фиксированных размерах индуктора и канала.

3. Разработаны рекомендации по выбору геометрических размеров линейной индукционной машины при фиксированной частоте источника питания.

4. Обоснована целесообразность применения одноплоскостной концентрической обмотки индуктора в МГД-насосах для транспортировки магния;

5. Выполнены экспериментальные исследования, на основе которых подтверждена адекватность разработанных моделей и проведенных расчетов.

Научно-технические решения по обоснованию целесообразности применения МГД-насосов с плоскими концентрическими катушками, разработанные математические модели и проведенные расчеты подтверждены экспериментальными исследованиями опытного-промышленного образца. Расхождение результатов моделирования, расчетов и экспериментов составляет не более 8%, что свидетельствует о высокой степени адекватности разработанных моделей и проведенных расчетов.

Теоретическая значимость работы: адаптация расчетной методики для исследования электромагнитных процессов в индукционных линейных машинах с двухслойными обмотками по методу ДСЗ.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- Разработана методика расчета электромагнитных и тепловых процессов с получением расход-напорной характеристики МГД-насосов. Данная методика позволяет произвести расчет характеристик разрабатываемого МГД-насоса, выбрать геометрические размеры машины с учетом максимального получаемого усилия, как на заданной частоте источника питания, так и при подборе частоты.

- Результаты исследований и научно обоснованные технические решения использованы при создании промышленного образца МГД-насоса для перекачки жидкого магния для ОАО «КУМЗ».

- Предложена новая конструкция обмотки плоского линейного индуктора, позволяющая повысить надежность машины при высоких температурах работы.

Методология и методы исследования определялись поставленными задачами и были основаны на теории электрических машин, а также теории электрических и магнитных цепей, методе детализированных магнитных и электрических схем замещения, эквивалентных тепловых схем замещения, методе конечных элементов. Математическая модель создана с применением пакета MathCAD, расчет производится в одном формуляре. Для наиболее точного описания краевых эффектов, возникающих в линейной индукционной машине а также уточнения коэффициентов теплоотдачи использовался пакет конечно-разностного моделирования COMSOL Multiphysics 3.5a. В работе проводятся экспериментальные исследования на опытно-промышленном образце линейного индукционного МГД-насоса.

Положения, выносимые на защиту:

- методика расчета электромагнитных и тепловых процессов с получением расход-напорной характеристики линейных индукционных МГД-насосов. Методика позволяет произвести расчет характеристик разрабатываемого МГД-насоса, выбрать геометрические размеры машины с учетом максимального

получаемого усилия, как на заданной частоте источника питания, так и при подборе частоты;

- результаты исследования опытно-промышленного образца линейного индукционного МГД-насоса для перекачки магния;
- результаты исследования соотношения размеров глубины паза и зубцового деления МГД-насоса с плоскими катушками;
- рекомендации по конструктивному исполнению плоских катушек с высокотемпературной тепло- и электроизоляцией для линейных индукционных МГД-насосов.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные результаты работы опубликованы в научной литературе, подтверждаются экспериментальными исследованиями. Разработан промышленный образец МГД-насоса с плоскими катушками для ОАО “КУМЗ”. Разработана технология изготовления высокотемпературной электроизоляции обмоток ПЛИН. Результаты исследования схем обмоток ПЛИН легли в основу заявки на изобретение «Двухслойные концентрические обмотки с плоскими катушками», поданной в соавторстве в 2013 г.

Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных мероприятиях:

- 15th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2014), Terchová - Vrátna dolina, Slovak Republic, September 09 -12, 2014.
- 2-ая Международная конференция «Магнито-левитационные транспортные системы и технологии», Санкт-Петербург, Россия, 2014 г.
- Международная конференция «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий, АПЭЭТ-2014», Россия, Екатеринбург, 2014 г.
- International Symposium on Theoretical Electrical Engineering 2013 (ISTET 2013), Pilsen, Czech Republic, June 24-26, 2013.
- III Международная научно-практическая конференция “Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии «ЭКСИЭ-03». Россия, Екатеринбург, 2013 г.
- Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». г. Севастополь, 17-20 сентября 2012 г.
- 2-ая Международная научно-практическая конференция “Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии” в рамках выставки “Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение в промышленности и ЖКХ”. Россия, Екатеринбург, 15 – 17 мая 2012г.
- Международная научно-практическая конференция «Электрические аппараты и электротехнические комплексы и системы». Россия, Ульяновск, 2012.
- XLI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Федоровские чтения 2011». Россия, Москва, 2011.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 24 печатные работы, в том числе 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Подана в соавторстве заявка на изобретение №2013148361.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, приложений. Общий объем 149 страниц. Основная часть изложена на 126 страницах машинописного текста, иллюстрирована 61 рисунком, 17 таблицами. Список использованной литературы содержит 100 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована и отражена актуальность разрабатываемой в диссертационной работе научной проблемы, описана степень разработанности, сформулированы цели и задачи которые необходимо решить, выделена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описана методология и методы исследования. Определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен анализ отечественной и зарубежной литературы, а также периодических изданий. Рассмотрены МГД-устройства для транспортировки легких цветных металлов, достоинства и недостатки конструкций кондукционных и индукционных МГД-насосов. Определены основные требования, предъявляемые к МГД-насосам: возможность встраивания МГД-насоса в существующий технологический процесс без значительного изменения конструкций рабочих площадок и замены источника питания; относительно высокое развиваемое усилие (определяет максимальный напор насоса); высокие рабочие температуры обмоток (металлотракт должен располагаться как можно ближе к активной части магнитной системы, а возможности теплоизоляции и охлаждения обмоток в условиях металлургического производства ограничены); конструктивная простота, легкость монтажа и обслуживания.

Проанализированы известные методы расчета линейных индукционных машин, сформулированы отличительные особенности каждого метода.

Сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математической модели взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в МГД-насосе.

Основной задачей исследования МГД-насоса ставилось определение тяговых усилий, необходимых для перекачивания жидкого металла по металлотракту. Особое внимание уделяется исследованию тепловых режимов работы МГД-насоса. Это связано с тем, что при небольшом воздушном зазоре, температура металлотракта достигает 750°C , что существенно влияет на температуру обмоток индуктора.

Блок-схема расчета представлена на рисунке 2.

Структура математической модели МГД-насоса на основе схем замещения включает три блока уравнений, записанных по второму закону Кирхгофа для многоконтурной электрической цепи индуктора, многоконтурной короткозамкнутой электрической цепи ВЭ и многослойной магнитной цепи.

Порядок системы уравнений при этом зависит от типа и степени детализации цепей индукционного устройства. Участок ДМСЗ плоского индуктора с поперечным полем приведен на рисунке 3.

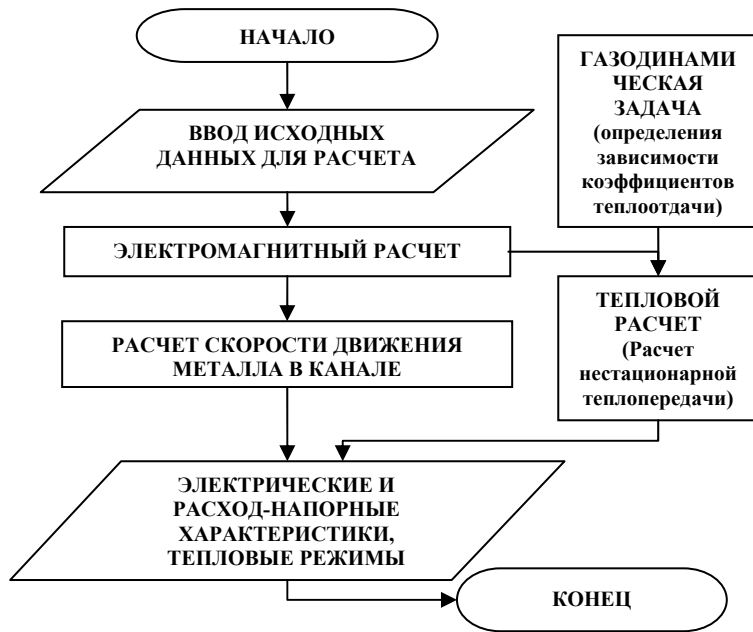


Рисунок 2 – Блок схема расчета МГД-насоса

Электромагнитная модель основана на методе детализированных электрических и магнитных схем замещения.

Расчетная область модели включает в себя послойно индуктор, теплоизоляцию канала, проводящую стенку канала и металл в канале. По продольной оси можно выделить участки краевых зон и участки активной зоны (рисунок 3).

Для моделирования пазового рассеяния область обмотки индуктора разбита на несколько слоев (рисунок 4). В этом случае образуются пути для потока пазового рассеяния, что позволяет более точно учесть это явление при моделировании, чем при помощи поправочных коэффициентов.

Величина нормального магнитного сопротивления в зубцовой зоне определяется величиной магнитной проницаемости зубца с учетом соотношения ширины зубца и паза магнитопровода.

$$R_n = \frac{1}{\mu_n} \cdot \frac{h_{сл}}{t_z \cdot l} \cdot \frac{b_p + b_z}{b_z}, \quad (1)$$

где: μ_n – нормальная магнитная проницаемость слоя, $h_{сл}$ – высота слоя, t_z – зубцовое деление, l – ширина индуктора. Значение МДС в пазах индуктора определяется исходя из уравнения:

$$(F) = U_n \cdot K_F \cdot (I), \quad (2)$$

где: (F) – матрица МДС, (I) – матрица токов, K_F – обмоточная матрица.

Для простого случая, когда обмотка

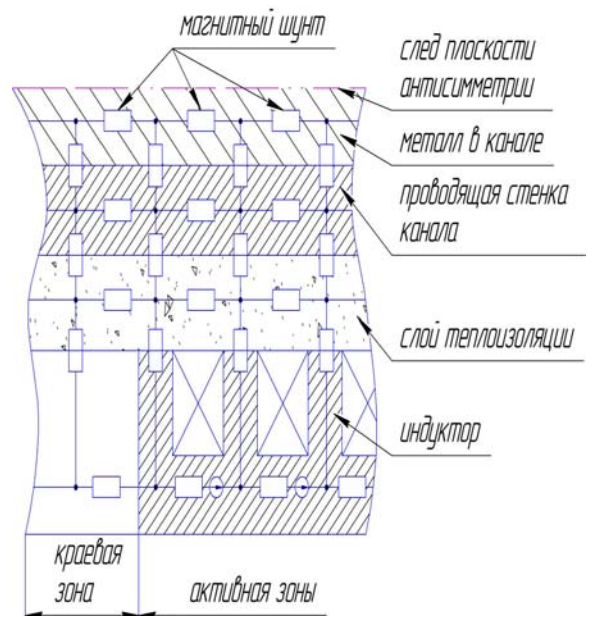


Рисунок 3 – Участок ДМСЗ плоского индуктора

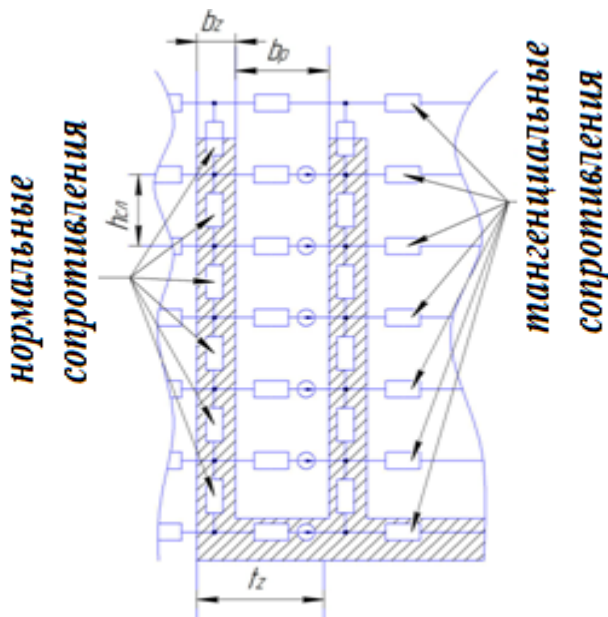


Рисунок 4 – Многослойная структура индуктора

индуктора укладывается в один слой, обмоточная матрица выглядит следующим образом (6 пазов, 2 полюса).

При двухслойном (двухуровневом) расположении катушек и укладке обмоток с укорочением шага в одном пазу оказываются проводники, по которым протекают токи разных фаз.

$$K_F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$$

краевая зона активная зона краевая зона

При формировании матриц следует учитывать свободные стороны катушек, расположенные за пределами магнитопровода. В этом случае необходимо определить матрицы формирования МДС для каждого из слоев (уровней) обмотки.

$$K_{F_{\text{верх}}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$$

$$K_{F_{\text{низ}}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}^T$$

краевая зона активная зона краевая зона

Схема моделируемой обмотки приведена на рисунке 5.

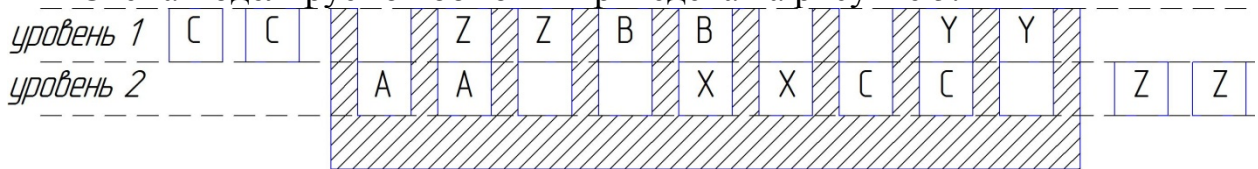


Рисунок 5 – Двухполюсная двухслойная (двухуровневая) concentрическая обмотка с укороченным шагом и свободными сторонами

Расчет дифференциальных и интегральных параметров индуктора при питании обмоток от источника напряжения производится в следующем порядке:

1. Определяются контурные магнитные потоки в ДМСЗ при питании обмотки единичными токами.

2. По найденным значениям магнитных потоков определяются ЭДС в обмотках индуктора при заданных единичных токах:

$$(E) = -j\omega U_n \cdot K_{F_{\text{верх}}}^T \cdot (\Phi) - j\omega U_n \cdot K_{F_{\text{низ}}}^T \cdot (\Phi), \quad (3)$$

где: (E) – матрица ЭДС фаз, U_n – число витков в катушке, $K_{F_{\text{верх}}}$, $K_{F_{\text{низ}}}$ – матрицы формирования МДС в верхнем и нижнем уровнях обмотки, (Φ) – матрица потоков.

3. По найденному значению ЭДС определяем сопротивление фаз индуктора.

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \underline{Z}_A & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_B & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_C \end{pmatrix}}_{(Z)} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где: (Z) – матрица электрических сопротивлений фаз индуктора,

$$\underline{Z}_A = R_A + j\omega L_A, \quad \underline{Z}_B = R_B + j\omega L_B, \quad \underline{Z}_C = R_C + j\omega L_C, \quad (5)$$

где R_A, R_B, R_C – активное сопротивление фаз обмоток;

$j\omega L_A, j\omega L_B, j\omega L_C$ – комплексное выражение индуктивных сопротивлений лобовых частей фаз обмоток.

4. Определяем токи фаз при приложенном реальном напряжении:

$$(I) = (Z)^{-1} \cdot (U), \quad (6)$$

где: (Z) – матрица сопротивлений

5. Определяем МДС в пазах при приложенном напряжении к катушкам фаз в каждом из уровней (слоев):

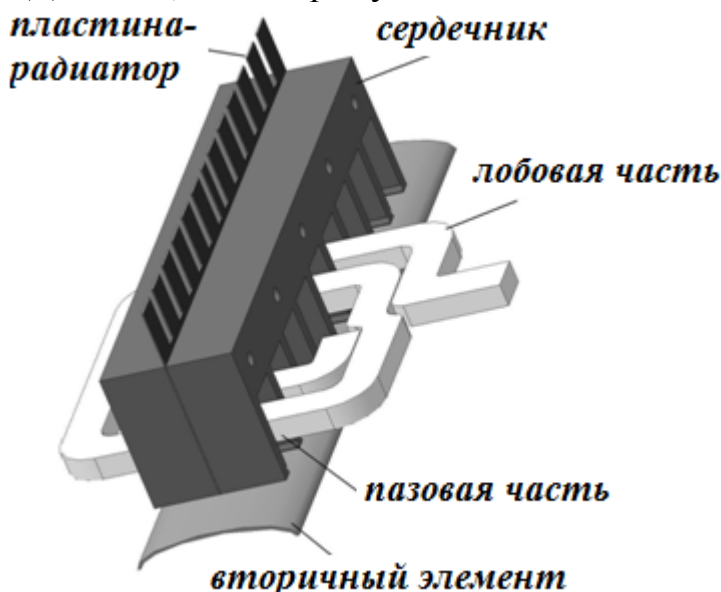
$$\begin{cases} (F_{\text{верх}}) = U_{\text{п}} \cdot K_{F_{\text{верх}}} \cdot (I) \\ (F_{\text{низ}}) = U_{\text{п}} \cdot K_{F_{\text{низ}}} \cdot (I) \end{cases}, \quad (7)$$

6. Распределяем МДС по слоям катушек каждого уровня.

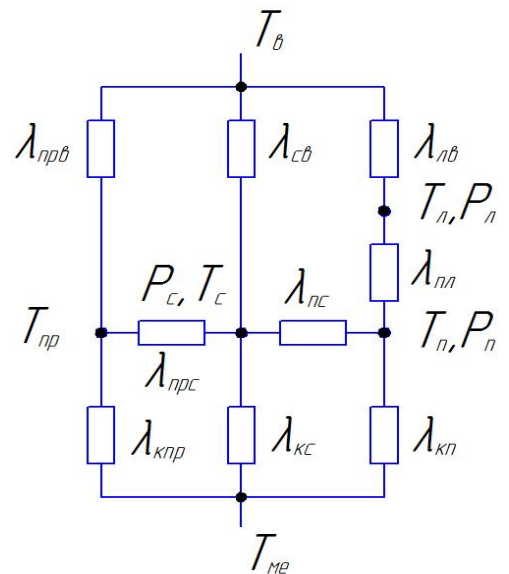
7. Определяем контурные потоки во всей детализированной схеме с учетом скорости течения металла в канале.

8. Производим расчет дифференциальных составляющих параметров: индукции, плотности тока, удельных объемных усилий, а также интегральных параметров: развиваемых усилий и потребляемых активной и реактивной мощностей фаз.

Расчет тепловых процессов, происходящих в МГД-насосе, производим с помощью метода эквивалентных тепловых схем замещения. На рисунке 6 – эскиз МГД-насоса, по которому составляется ЭТС.



а



б

Рисунок 6 – Эскиз(а) и эквивалентная тепловая схема(б) МГД-насоса

Схема выделяет элементы являющиеся тепловыми источниками и тепловыми проводимостями. Для данной схемы составляется система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} c_l \cdot M_l \frac{dT_l}{dt} = -(\lambda_{lv} + \lambda_{nl}) \cdot T_l + \lambda_{lv} T_v + \lambda_{nl} T_n + P_l, \\ c_n \cdot M_n \frac{dT_n}{dt} = -(\lambda_{nl} + \lambda_{kn} + \lambda_{nc}) \cdot T_n + \lambda_{kn} T_{me} + \lambda_{nl} T_l + \lambda_{nc} T_c + P_n, \\ c_c \cdot M_c \frac{dT_c}{dt} = -(\lambda_{nc} + \lambda_{nrc} + \lambda_{cv} + \lambda_{kc}) \cdot T_c + \lambda_{cv} T_v + \lambda_{nc} T_n + \lambda_{nrc} T_{nr} + \lambda_{kc} T_{me} + P_c, \\ c_{nr} \cdot M_{nr} \frac{dT_{nr}}{dt} = -(\lambda_{knr} + \lambda_{nrc} + \lambda_{nrv}) \cdot T_{nr} + \lambda_{knr} T_{me} + \lambda_{nrc} T_c + \lambda_{nrv} T_v \end{cases}, \quad (8)$$

Часть тепловых проводимостей в схеме на рисунке 6(б) определяется, исходя из интенсивности теплообмена с воздухом при естественной и вынужденной конвекции. Поэтому становится актуальной задачей определения реальных коэффициентов теплоотдачи с поверхности стали индуктора и пластин радиаторов. Для этого в пакете Comsol Multiphysics была создана двухмерная модель тепловых и газодинамических процессов при естественной конвекции. Задача расчета реальных коэффициентов теплоотдачи сводилась к расчету задачи теплопередачи совместно с решением задачи газодинамики на основе уравнений Навье-Стокса (9) для слабосжимаемой среды.

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - (2\eta/3 - k_{dv})(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}] + \mathbf{F}\nabla, \quad (9)$$

$$(\rho \mathbf{u}) = 0,$$

где: p – давление, \mathbf{u} – скорость, \mathbf{I} – единичная матрица, k_{dv} – дилатационная вязкость, \mathbf{F} – внутренние силы (Архимедова сила), ρ – плотность, η – динамическая вязкость.

После решения задачи производится операция интегрирования теплового

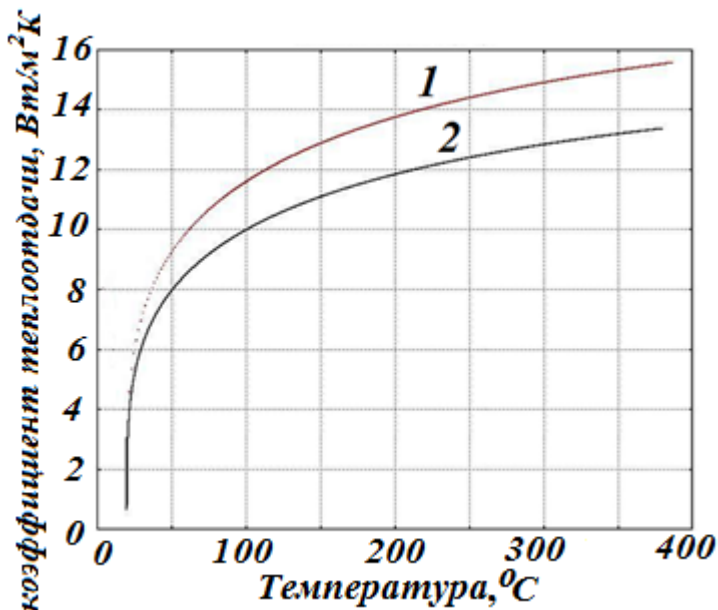


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры

1 – магнитопровод, 2 – пластина-радиатор

потока по поверхности магнитопровода и пластин-радиаторов для получения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от температуры (рисунок 7).

Полученные данные коэффициентов теплоотдачи использовались в тепловом расчете по методу ЭТС, вместо справочных данных.

Для верификации разработанной компьютерной модели были проведены эксперименты на опытно-промышленном образце МГД-насоса для перекачки магния, описанном в главе 4 и

изображенном на рисунке 11.

Исследование опытно-промышленной установки заключалось в замере интегральных параметров установки: линейного общего (на два индуктора) и фазного токов (на каждый индуктор). Обмотки индукторов соединены треугольником, поэтому производились измерения линейных напряжений. Оба индуктора соединены параллельно. Линейный суммарный ток на два индуктора измерялся трансформаторами тока, фазный ток токовыми клещами.

Интегральные параметры МГД-насоса представлены в таблице 1. Расчетные данные были получены при помощи разработанной компьютерной модели.

Таблица 1

Интегральные параметры МГД-насоса

| Расчетные данные | | | | | Экспериментальные данные | | | | |
|----------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------|-------------|------------|-------------|---------------|
| <i>Эксперимент 1</i> | | | | | | | | | |
| Фаза | $U_L, В$ | $I_L, А$ | $I_\Phi, А$ | $F, Н$ | Фаза | $U_L, В$ | $I_L, А$ | $I_\Phi, А$ | $F, Н$ |
| <i>AB (A)</i> | 3.48 | 177,5 | 50,3 | без ВЭ | <i>AB (A)</i> | 3.48 | 157 | 50 | без ВЭ |
| <i>BC (B)</i> | 4.26 | 180,1 | 51,4 | | <i>BC (B)</i> | 4.26 | 182 | 53 | |
| <i>CA (C)</i> | 4.50 | 157,4 | 47,45 | | <i>CA (C)</i> | 4.50 | 163 | 46 | |
| <i>Эксперимент 2</i> | | | | | | | | | |
| Фаза | $U_L, В$ | $I_L, А$ | $I_\Phi, А$ | $F, Н$ | Фаза | $U_L, В$ | $I_L, А$ | $I_\Phi, А$ | $F, Н$ |
| <i>AB (A)</i> | 5.62 | 303 | 110,5 | 30,4 | <i>AB (A)</i> | 5.62 | 318 | 114 | 30 |
| <i>BC (B)</i> | 6.45 | 399 | 114,8 | | <i>BC (B)</i> | 6.45 | 400 | 108 | |
| <i>CA (C)</i> | 6.51 | 379 | 89,03 | | <i>CA (C)</i> | 6.51 | 349 | 85 | |
| <i>Эксперимент 3</i> | | | | | | | | | |
| Фаза | $U_L, В$ | $I_L, А$ | $I_\Phi, А$ | $F, Н$ | Фаза | $U_L, В$ | $I_L, А$ | $I_\Phi, А$ | $F, Н$ |
| <i>AB (A)</i> | 8,8 | 422 | 169,5 | 67,1 | <i>AB (A)</i> | 8,8 | 450 | 162 | 68 |
| <i>BC (B)</i> | 10,0 | 537 | 165 | | <i>BC (B)</i> | 10,0 | 540 | 154 | |
| <i>CA (C)</i> | 11,3 | 464 | 128,6 | | <i>CA (C)</i> | 11,3 | 460 | 128 | |

Максимальное расхождение по току составляет не более 6,5%.

В результате расчета модели МГД-насоса по методу ДСЗ в среде MathCAD были получены кривые распределения нормальной составляющей индукции в зазоре МГД-насоса, так же в ходе эксперимента производились измерения индукции магнитного поля в зазоре МГД-насоса. Расчетная и экспериментальная результаты представлены на рисунке 8.

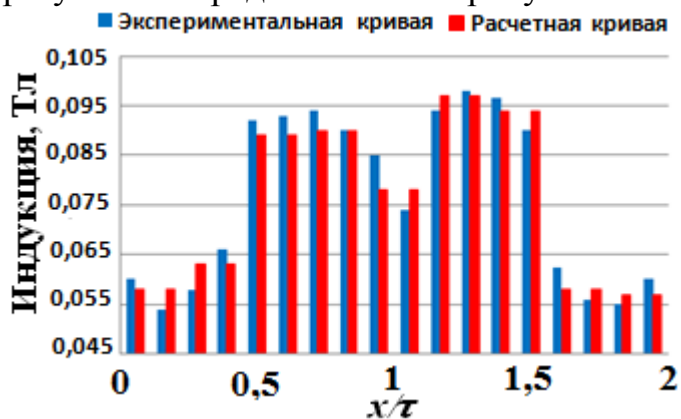


Рисунок 8 – Распределение индукции магнитного поля в зазоре МГД-насоса

При сравнении результатов расчета, полученных в компьютерной модели при решении электромагнитной задачи по методу ДСЗ, и эксперимента расхождение составило не более 8%. Данный факт свидетельствует о том, что предложенная модель, созданная в среде MathCAD, подходит для получения достаточной точности при расчетах интегральных параметров МГД-насосов.

В главе приведены результаты экспериментального исследования теплового состояния МГД-насоса и их сравнение с расчетными данными. Физический эксперимент (рисунок 9) проводился на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод» во время отливки магниевого сплава в кристаллизатор диаметром 680 мм и длиной полученного слитка 3500 мм. Отливка происходила при скорости 34 мм/минуту и составила 5880 секунд. Температура перекачиваемого сплава 750°C. На рисунке 10 представлены сравнение результатов экспериментального исследования с расчетными данными. Значения тока и напряжения выбирались исходя из параметров источника питания установки для перекачки магния на ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод».



Рисунок 9 – Отливка магниевого сплава при помощи опытно-промышленного образца МГД-насоса

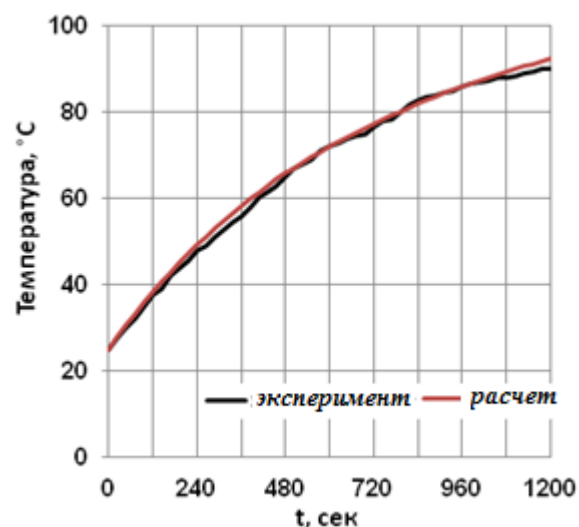


Рисунок 10 – Результаты нагрева лобовой части МГД-насоса

В результате эксперимента, через 1200 секунд достигнуты следующие температуры: лобовых частей обмотки – 90°C; пазовой части обмотки - 65°C; температура магнитопровода – 58°C. В результате вычислительного эксперимента получены следующие температуры: температура лобовой части обмотки – 93°C; температура пазовой части – 67°C; температура магнитопровода – 60°C. Расхождение с экспериментом составляет 5-7%.

В третьей главе проведены исследования конструкций обмоток ПЛИН. Проведено сравнение схем обмоток ПЛИН с различным числом полюсов, с различным относительным шагом и числом зон. В качестве критерия сопоставления вариантов было положено равенство электрических потерь индукторов, или равенство фактора нагрева AJ (10).

$$AJ = A \cdot J = const, \quad (10)$$

где: A – линейная нагрузка машины, J – плотность тока проводника обмотки. Поэтому при изменении конструкции обмоток – числа зон, числа пазов на полюс и фазу, относительного шага обмоток и т.д., производилось изменение геометрии паза таким образом, чтобы фактор нагрева оставался неизменным.

Для улучшения весогабаритных показателей предлагается применение обмоток с небольшим по сравнению с прототипом (МГД-насос, 6-ти полюсный с полным шагом, установленный на ОАО «Каменск-Уральский металлургический

завод») укорочением шага. Это приводит к уменьшению коэффициента заполнения пазов индуктора при сравнительно небольшом уменьшении обмоточного коэффициента и как следствие – к увеличению отношения развиваемого усилия к потребляемой мощности, уменьшению расхода материалов на изготовление индуктора той же мощности, уменьшению габаритов индуктора.

Анализ достаточно широкого спектра вариантов обмоток с различным числом зон, пазов на полюс и фазу, относительным шагом и т.п. позволяет при ограниченных габаритах машины сделать выбор в пользу схемы обмотки с $q=2$ и укорочением 4/4.5(рисунок 11).

| № паза | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
|--------|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| Слой 1 | C C | | Z | Z | B | B | | | Y | Y | |
| Слой 2 | | A | A | | | X | X | C | C | | Z Z |

Рисунок 11 – Двухслойная концентрическая обмотка с $q=2$ и укорочением 4/4.5

Приведенные результаты исследования легли в основу заявки на изобретение №2013148361 «Двухслойные концентрические обмотки с плоскими катушками», поданную в соавторстве 29.10. 2013г.

В четвертой главе описано создание опытно-промышленного образца линейного индукционного МГД-насоса с плоскими катушками. Разработана технология получения высокотемпературной изоляции. Проведены исследования тепловых режимов МГД-насоса с высокотемпературной изоляцией при помощи математической модели, построенной на базе эквивалентных тепловых схем (ЭТС) и метода конечных разностей (МКР).



Рисунок 12 – Магнитопроводы МГД-насоса установленные на раму

На кафедре ЭЭС создан опытно-промышленный образец двухстороннего плоского линейного индукционного МГД-насоса (рисунок 12). Магнитопровод индуктора МГД-насоса представляет собой шихтованную конструкцию из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Пакет магнитопровода состоит из пластин электротехнической стали, трех

пластин-радиаторов из алюминия и двух стяжных щек из нержавеющей стали. Ширина пакета магнитопровода L_1 – 84мм, полюсное деление τ – 180мм, число полюсов $2p$ – 2, высота ярма h_A – 40мм, зубцовое деление t_Z – 40мм, высота зубца h_Z – 58,5мм, число пазов z – 9.

Результаты расчетов показали, что максимальное развиваемое приведенное усилие из схем, которые можно реализовать на практике, показала двухполюсная схема с двухслойной концентрической обмоткой с укороченным шагом и 9-тью пазами. Кроме того, уменьшение числа пазов делает конструкцию насоса более технологичной и ремонтпригодной.

Индуктор МГД-насоса включает в себя 4 катушки, каждая из которых состоит из четырех слоев по 4 витка. Слои обмоток были выполнены путем вырезания их на установке гидроабразивной резки из листа алюминия марки АД1

толщиной 4 мм. Для образования электроизоляционного слоя на алюминиевой обмотке МГД-насоса использовался процесс анодирования. Индукционный МГД-насос предназначен для транспортировки легких цветных металлов, температура перекачки которых может достигать 750°C . Магнитопровод защищен от высокой температуры канала 6 мм слоем каолиновой ваты. Температура на поверхности магнитопровода при этом достигает 500°C .

В связи с этим катушки МГД-насоса обрабатывались органосиликатной композицией ОС-82-01, предназначенной для изоляции высокотемпературных линий связи тензорезисторов. Данная композиция предусматривает процесс горячего отверждения, при котором покрытая деталь выдерживается при температуре окружающего воздуха, затем производится постепенный подъем температуры до температуры эксплуатации (500°C) и выдержка при данной температуре не менее 3 часов.

Расчет теплового режима с помощью разработанной компьютерной модели проводится для определения установившихся температур в отдельных элементах машины, прежде всего распределения температуры в пазовой и лобовых частях обмотки, в целях установления эффективности принятой системы охлаждения при выбранных электромагнитных нагрузках.

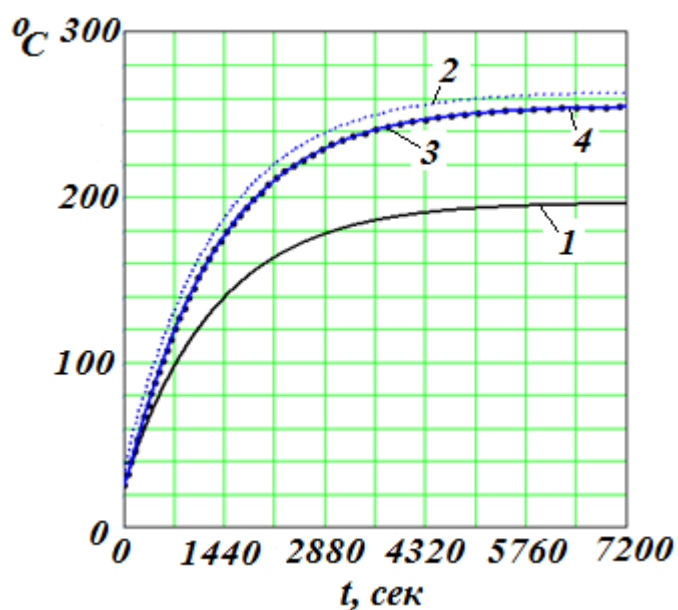


Рисунок 13 – Результаты нагрева в номинальном режиме работы МГД-насоса металлтракта 750°C (рисунок 13, где: 1 – температура лобовой части обмотки, 2 – температура пазовой части обмотки, 3 – температура магнитопровода, 4 – температура пластин-радиаторов).

Исследования показывают, что можно увеличить плотность тока в проводниках и вывести МГД-насос на повышенную мощность и использовать его для перекачки более тяжелых цветных металлов (алюминий, цинк, свинец).

В пятой главе представлены результаты исследования электромагнитных процессов в линейной индукционной машине при помощи созданной компьютерной модели с использованием полевого пакета Comsol Multiphysics для учета в полной мере продольного и поперечного краевых эффектов,

Снижение температуры активных частей МГД-насосов осуществляется развитием поверхности конструктивных элементов на магнитопроводе, для этого небольшое количество шихтованных листов из электротехнической стали заменяют на сделанные из алюминия пластины-радиаторы.

Результаты расчета показывают, что с применением высокотемпературной изоляции и пластин радиаторов температура обмотки МГД-насоса не превышает 260°C при номинальном режиме работы с заданной температурой

экранирующего влияния проводящей стенки канала, поверхностного эффекта в массивных проводниках обмотки.

Исследования, представленные в данной главе, позволяют производить оценку выбора геометрических размеров машины с учетом максимума получаемого усилия на выбранной частоте источника питания. Они также позволяют обосновать выбор частоты источника при фиксированных размерах индуктора и канала.

Для наиболее точного описания краевых эффектов, возникающих в линейной индукционной машине плоской конструкции необходимой и достаточной является трехмерная постановка задачи (рисунок 14).

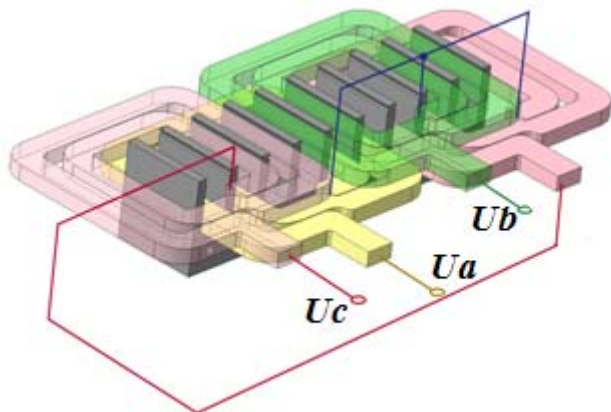


Рисунок 14 – Схема соединения обмоток и терминалы подключения источника напряжения в 3D модели

Индуктор в этом случае располагается в трехмерной подобласти, ограниченной со всех сторон кроме плоскости симметрии гранями наложенным нулевым граничным условием Дирихле.

Задача формулируется относительно векторного магнитного потенциала. Поле в модели описывается следующим дифференциальным уравнением в частных производных.

$$(j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \mathbf{A} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) + (\sigma + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla V = \mathbf{J}^e = 0, \quad (11)$$

где: \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, \mathbf{J}^e – сторонняя плотность тока, V – электрический потенциал, ω – угловая частота, $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ – тензор диэлектрической проницаемости, $\mu_0^{-1} \mu_r^{-1}$ – обратная величина тензора магнитной проницаемости, σ – удельная электропроводность.

Геометрия модели отражена на рисунке 14. Моделируемая подобласть представляет собой прямоугольный параллелепипед, ограниченный снизу спинкой магнитопровода, сверху – плоскостью антисимметрии (на этой границе тангенциальная составляющая магнитного поля приравнивается нулю, то есть применено однородное граничное условие Неймана), с остальных сторон оставлен воздушный промежуток 10 мм от границ катушек для замыкания полей рассеяния.

При проведении вычислительных экспериментов производилось изменение частоты источника напряжения, питающего обмотки индуктора. При этом существенно изменялось как активное, так и индуктивное сопротивления обмоток. Индуктивное сопротивление обмоток в свою очередь прямо пропорционально частоте источника питания. Поэтому напряжение подбиралось таким образом, чтобы суммарный ток в проводнике, полученный путем интегрирования плотности тока по сечению, оставался неизменным. Исследование показало, что в основном падение напряжения на катушках

обусловлено их индуктивным сопротивлением, поэтому полученные числовые значения отвечают выражению $U/f = \text{const}$.

В таблице 2 приведены результаты проведенных вычислительных экспериментов. При сравнении соотношений мощностей тепловыделения в металле (P_{me}) и стенке канала (P_k) видно, что при повышении частоты увеличивается экранирующий эффект стенки канала.

Таблица 2 Результаты расчета

| Частота, Гц | $\frac{F_T^{me}}{F_T^k}$ | $\frac{P_{me}}{P_k}$ |
|-------------|--------------------------|----------------------|
| 10 | 3.53 | 4.24 |
| 50 | 3.51 | 4.21 |
| 200 | 3.28 | 3.85 |
| 729 | 2.24 | 2.44 |

В результате вытеснения тока к поверхности канала, в его проводящую стенку, также возрастает сопротивление канала, что приводит к значительному ослаблению наведенного тока и электродинамического усилия. Это видно при исследовании соотношения тяговых усилий, создаваемых в металле (F_T^{me}) и стенке канала (F_T^k) соответственно.

Можно утверждать, что частота питающего тока существенно влияет на краевые эффекты в канале, что в полной мере отражается в созданной компьютерной модели.

В ходе исследований была получена зависимость развиваемого усилия от электромагнитной добротности. Этот параметр помимо частоты тока в обмотках связывает как основные размеры насоса, так и электропроводность среды:

$$Q_f = 2\pi f \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot \frac{\tau^2}{\pi^2} \cdot \frac{d}{\delta}, \quad (12)$$

где τ - полюсное деление, δ - расстояние между индукторами, d - эквивалентная толщина канала, f - частота, σ - электропроводность среды.

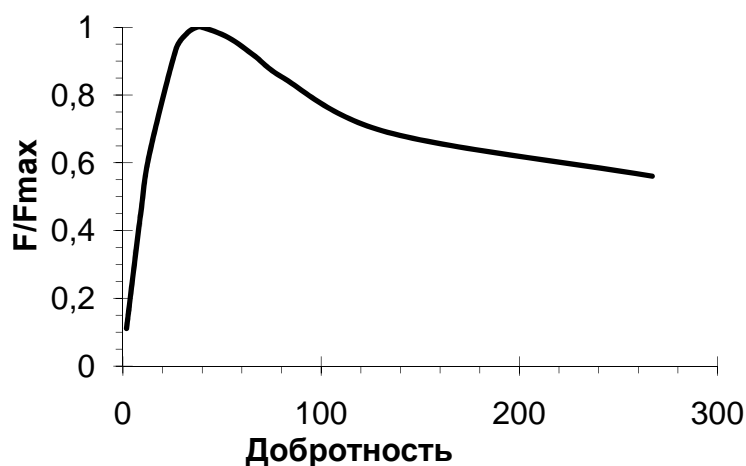


Рисунок 15 – Зависимость относительного усилия от электромагнитной добротности металла ($\gamma = 3.497 \cdot 10^6$ См/м), оптимальная частота сместилась к уровню 679 Гц.

В главе приводятся результаты исследования влияния геометрии зубцово-пазовой зоны на характеристики индукционного магнитогидродинамического насоса. При рассмотрении линейных индукционных машин встает задача

Усилие удобно также представить в обобщенном виде как отношение текущего усилия на соответствующей частоте к максимальному полученному усилию. Зависимость изображена на рисунок 15.

Для приведенной конструкции насоса максимальное усилие было получено при 220 Гц, что соответствует добротности 34.5. При пересчете полученных данных на расплавленный

исследования, при каком соотношении глубины паза к зубцовому делению с фиксированным значением фактора нагрева (произведении плотности тока в проводниках обмотки и линейной нагрузки), будет достигнут максимум пускового усилия при минимальных затратах. Основным фактором, ограничивающим глубину паза, является насыщение зубцов магнитопровода индуктора.

Оценить эффективность использования материалов, идущих на создание насоса можно по двум критериям: во-первых – отношение развиваемого усилия в канале к суммарным затратам материала обмоток и магнитопровода $K_{э.мат} = \frac{F}{M_{ст} + M_{меди}}$ (кривая №1, рисунок 16), и во-вторых – отношение развиваемого усилия к суммарным электрическим и магнитным потерям $K_{э.эн.} = \frac{F}{\Delta P_{эл} + \Delta P_{мн}}$ (кривая №2, рисунок 16). Первый фактор определяет минимум капитальных затрат на создание насоса, второй – позволяет оценить эксплуатационные затраты. На рисунке 16 приведены расчетные зависимости этих относительных параметров. $K_{э.мат} i^* = \frac{K_{э.мат} i}{K_{э.мат} max}$, $K_{э.эн} i^* = \frac{K_{э.эн} i}{K_{э.эн} max}$ от соотношения глубины паза и зубцового деления.

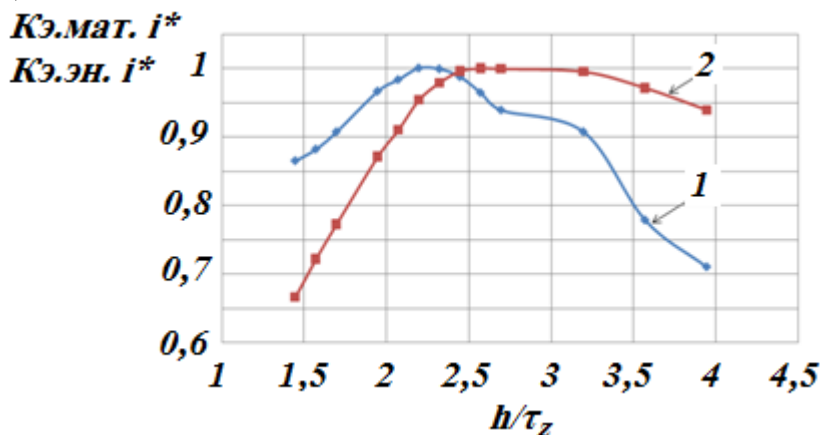


Рисунок 16 – Зависимости удельного усилия от соотношения глубины паза и зубцового деления

Как видно, наиболее выгодное отношение зубцового деления к высоте паза находится в диапазоне от 2,25 до 2,5 при соотношении ширины зубца к зубцовому делению 1/3. В отсутствие каких-либо ограничений со стороны завода, при неизменной длине индуктора и возможности изменить геометрические

размеры паза мы можем получить развиваемое усилие в 4 раза больше, чем полученное усилие в разработанном опытно-промышленном образце.

При встраивании МГД-насоса в технологический процесс важно знать, в каком режиме будет работать проектируемое устройство. Произвести эту оценку помогает расход-напорная характеристика (зависимость напора от подачи (расхода) насоса). Данная характеристика получена с помощью компьютерной модели на основе метода ДСЗ. Расход-напорная характеристика является важным инструментом для определения рабочей точки работы насоса в реальных условиях. Параметры насоса, определяемые с ее помощью, могут быть выражены через интегральные параметры линейной индукционной машины, лежащей в основе его конструкции. Следует учесть также потерю давления трением жидкости в канале.

На рисунке 17 представлены расход-напорные характеристики трех МГД-насосов для транспорта расплавленного магния: МГД-насос №1 установленного

на ОАО КУМЗ с числом пар полюсов $p=3$. МГД-насос имеет 18 пазов. Линейная нагрузка 36,5 А/мм. Плотность тока $2,8 \cdot 10^6$ А/мм²; МГД-насос №2 с числом пар полюсов $p=1$. МГД-насос имеет 9 пазов. Линейная нагрузка 34,8 А/мм. Плотность тока $2,93 \cdot 10^6$ А/мм²; МГД-насоса №3, насоса с предельными техническими характеристиками с числом пар полюсов $p=1$. МГД-насос имеет 9 пазов. Линейная нагрузка 50 А/мм. Плотность тока $2,061 \cdot 10^6$ А/мм².

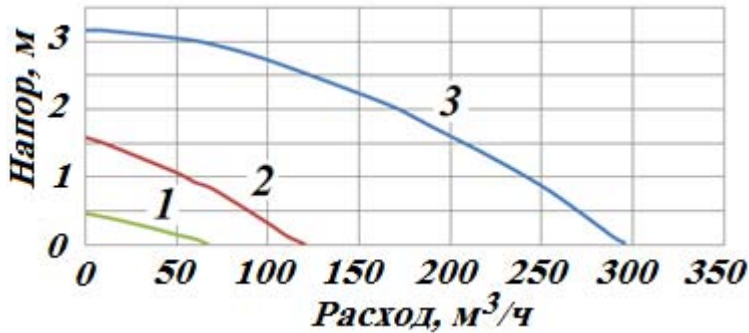


Рисунок. 17 – Расход-напорные характеристики МГД-насосов

Использование наиболее выгодного значения добротности 34,5 позволяет получить для этой конструкции насоса максимально возможное пусковое усилие. Тем не менее, максимум КПД насоса достигается в режиме, далеком от пускового. Для насоса с предельными характеристиками КПД, определяемый механической энергией,

переданной расплавленному металлу, будет несколько ниже, чем у насоса, выполненного без учета вышеперечисленных рекомендаций. Таким образом, можно заключить, что зависимости, приведенные на рисунке 16 справедливы для определения размеров зубцово-пазовой структуры насоса, имеющего максимальное пусковое усилие при минимуме затрат, но не максимальный КПД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа представляет собой развитие разработок коллектива кафедры ЭЭС ФГАОУ ВПО УрФУ в области исследования взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов в линейных индукционных МГД-насосах. Основные результаты диссертации:

1. Выполнен анализ существующих конструкций индукционных и кондукционных МГД-насосов, методов электромагнитного расчета индукционных устройств, методов расчета тепловых процессов специальных электрических машин.
2. Разработана методика расчета МГД-насосов, предназначенная для исследования электромагнитных и тепловых процессов на основе ДСЗ и ЭТС, произведена доработка существующих моделей с учетом конструктивных и технологических особенностей МГД-насосов. Программа реализована в среде MathCAD в одном формуляре с электромагнитным расчетом. В разработанной модели добавлен алгоритм расчета коэффициентов теплоотдачи с использованием конечно-элементного пакета Comsol (расчет свободной конвекции в задаче газодинамики для слабосжимаемой среды).
3. Исследованы различные схемы обмоток ПЛИН. Анализ достаточно широкого спектра вариантов обмоток с различным числом зон, пазов на полюс и фазу, относительным шагом и т.п. позволяет при ограниченных габаритах машины сделать выбор в пользу схемы двухслойных концентрических обмоток с $q=2$ и укорочением 4/4.5. Результаты исследования легли в основу заявки на

изобретение №2013148361 «Двухслойные концентрические обмотки с плоскими катушками», поданную в соавторстве 29.10. 2013 г.

4. Проведены исследования наиболее выгодного соотношения размеров зубцово-пазовой зоны для определения оптимальной конструкции индуктора МГД-насоса с выбранной конструкцией обмоток и максимальным развиваемым усилием, а также максимальным использованием магнитного материала. Исследования показали, что наиболее выгодным соотношением размеров глубины паза и зубцового деления МГД-насоса с плоскими катушками будет значение в диапазоне от 2,25 до 2,5 при соотношении ширины зубца к зубцовому делению 1/3. Использование наиболее выгодного значения добротности 34,5 позволяет получить для этой конструкции насоса максимально возможное пусковое усилие.

5. Создан опытно-промышленный образец МГД-насоса для перекачки магния с применением высокотемпературной тепло- и электроизоляции. При сравнении интегральных параметров МГД-насоса, полученных при его моделировании, с данными, полученными экспериментальным путем, расхождение составило не более 8%, что подтверждает достоверность результатов выполненных исследований.

6. Проведен анализ теплового состояния МГД-насоса, подтверждена эффективность применения высокотемпературной изоляции и пластин-радиаторов. При малых зазорах, около 40 мм, температура металлотракта достигает 750°C. При использовании разработанной высокотемпературной изоляции, на основе органосиликатной композиции ОС-82-01, способной выдерживать температуры до 500°C, обмотки МГД-насоса нагреваются не более 260°C в номинальном режиме работы. Применение пластин-радиаторов в пакете магнитопровода привело к снижению температур пазовой части с 306°C до 263°C, лобовой части с 215°C до 195°C, магнитопровода с 300°C до 254°C.

7. Представленные исследования тепловых режимов разработанного МГД-насоса, показывают возможность повышения плотности тока до 6 А/мм², без применения принудительного охлаждения. При этом температура пазовой и лобовой части не превышает 480°C, а развиваемое усилие увеличивается в 3раза.

8. Разработаны практические рекомендации для создания технологичных обмоток ПЛИН с применением современных технологий обработки металлов и современных тепло и электроизоляционных материалов. Обмотка индуктора выполнена из листа алюминия, при помощи гидроабразивной резки. Данный факт значительно упрощает изготовление обмотки и избавляет от трудоемкой операции по намотке катушек. Для увеличения электроизоляционных свойств изоляции, была проведена электрохимическая обработка (анодирование) поверхности катушек. Получены технологические параметры обработки поверхности катушек для достижения достаточной электрической и механической прочности покрытия.

9. Построены расход-напорные характеристики для оценки режимов работы МГД-насосов. КПД при питании разработанного МГД-насоса от источника промышленной частоты составляет 9.6%, тогда как КПД насоса прототипа – 1.2%.

Перспектива дальнейших разработок:

1. Исследования систем тяговых линейных двигателей с плоскими катушками.

2. Исследования возможности применения новейших наноструктурированных тепло- и электроизоляционных материалов катушек индуктора линейных индукционных насосов дающих возможность уменьшения толщины слоя изоляции для увеличения коэффициента заполнения паза.

СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Тарасов, Ф.Е. Стенд для исследования модели магнитогидродинамического насоса / Ф.Е. Тарасов, Б.А. Сокунов // Промышленная энергетика. – 2010. – №5. – С. 60 – 62. (0.15 п. л. / 0.1 п. л.).
2. Тарасов, Ф.Е. Повышение энергоэффективности магнитогидродинамических машин за счет внутренней компенсации реактивной мощности / Ф.Е. Тарасов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, В.Э. Фризен, А.А. Идиятулин // Известия СПбГТУ «ЛЭТИ». – 2013. – №1. – С. 51 – 56. (0.375 п. л. / 0.2 п. л.).
3. Тарасов, Ф.Е. Исследование гидромеханических процессов в жидкометаллическом роторе индукционного вращателя / Ф.Е. Тарасов, Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, В.Э. Фризен // Индукционный нагрев. – 2012. – №4. – С. 21– 25. (0.3 п. л. / 0.1 п. л.).
4. Тарасов, Ф.Е. Об электромагнитном воздействии на расплав алюминия при его модифицировании / Ф.Е. Тарасов, Н.В. Коробова, А.Ю. Аксененко, В.Э. Фризен, В.И. Лузгин, С.М. Фаткуллин // Metallurgy машиностроения. – 2013. – №1. – С. 8 – 11. (0.25 п. л. / 0.15 п. л.).
5. Тарасов, Ф.Е. О влиянии условий кристаллизации на структуру тиксозаготовок из литейных Al сплавов / Ф.Е. Тарасов, А.Ю. Аксененко, С.А. Бычков, В.Н. Климов, Н.В. Коробова, В.Э. Фризен, С.Ю. Шевченко // Metallurgy машиностроения. – 2013. – №2. – С. 17 – 20. (0.25 п. л. / 0.15 п. л.).

Другие публикации

6. Тарасов, Ф.Е. Экспериментальное исследование магнитогидродинамического насоса / Ф.Е. Тарасов, Б.А. Сокунов, А.А. Идиятулин, С.М. Фаткуллин // Материалы второй научно-практической конференции с международным участием «Инновационная энергетика 2010». – 2010. – С. 283 – 287. (0.31 п. л. / 0.15 п. л.).
7. Тарасов, Ф.Е. Сравнительный анализ схем обмоток индукционного МГД-насоса / Ф.Е. Тарасов, С.А. Бычков, С.Л. Назаров, С.Ю. Солодов, К.Е. Болотин, В.Э. Фризен // Сборник докладов III международной научно-практической конференции “Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии «ЭКСИЭ-03»”. – 2013. – С. 45 – 50. (0.375 п. л. / 0.15 п. л.).
8. Тарасов, Ф.Е. Индукционный МГД-насос с плоскими катушками / Ф.Е. Тарасов, С.А. Бычков, С.Л. Назаров, В.Э. Фризен // Сборник научных трудов

международной конференции “Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий «АПЭЭТ-2014»”. – 2014. – С. 119 – 124. (0.375 п. л. / 0.1 п. л.).

9. Tarasov, F. Optimal frequency determination of induction MHD pump power supply Proceedings of abstracts / F. Tarasov, S. Bytchcov, S. Nazarov, V. Frizen // Proceedings of abstracts The 15th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. Slovak Republic, Terchova-Vratnadolina. – 2014. – P. 67 – 70. (0.25 п. л. / 0.1 п. л.).

10. Tarasov, F. Coil connection diagrams of induction MHD-pump with flat coils / F. Tarasov, S. Bytchcov, S. Nazarov, V. Frizen // Proceedings of abstracts The 15th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering. Slovak Republic, Terchova-Vratnadolina. – 2014. – P. 63 – 66. (0.25 п. л. / 0.1 п. л.).

Подписано в печать
Офсетная печать

Формат 60 x 84 1/16
Тираж 120

Бумага писчая
Заказ №