

На правах рукописи



Иванников Юрий Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АКТИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Самара 2019

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ)

Научный руководитель: **Макаричев Юрий Александрович**
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Ганджа Сергей Анатольевич**, доктор технических наук, доцент, декан энергетического факультета, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ)», г. Челябинск.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» доцент, ведущий научный сотрудник кафедры «Электромеханика», г. Уфа.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "**Национальный исследовательский университет "МЭИ"**

Защита диссертации состоится 10 декабря 2019 г. в 10ч. на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу: 443100, Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://samgtu.ru>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.217.04

кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электромагнитный подшипник (ЭМП) – это электромеханическое устройство, предназначенное для передачи механических (статических и динамических) нагрузок от подвижных частей механизма (вращающийся вал) – неподвижным, жестко закрепленным частям (корпус) без непосредственного контакта между ними. Различают несколько типов электромагнитных подшипников, однако по объективным причинам наибольшее распространение получили активные электромагнитные подшипники (АЭМП).

Основными преимуществами АЭМП являются отсутствие механического контакта между вращающимися деталями, экологическая чистота, возможность управления положением ротора и т.п. Это в значительной степени определяет их область применения: машины с быстроходными роторами (высокоскоростные шпиндели, центрифуги и т.п.), устройства, в которых не допускается использование смазочных материалов (космические аппараты, атомная энергетика, медицина). Использование нагнетателей с АЭМП в магистральных газопроводах по экономическим соображениям оказалось очень перспективным, даже не смотря на некоторые присущие АЭМП недостатки.

Поскольку АЭМП являются относительно новым типом электромеханических преобразователей, и в технической литературе их теория изложена еще не достаточно полно, то их проектирование, как правило, ведется с использованием соотношений, применяемых при расчете классических электрических машин. При этом из-за существенных отличий обеспечивается относительно невысокая точность расчетов, по данным ФГУП «НПП ВНИИЭМ» порядка 15 – 20%. В результате чего для перекрытия погрешности используются увеличенные коэффициенты запаса по наиболее важным характеристикам: несущей способности, максимальному току, ожидаемой температуре и т.п.

Тепловое состояние электромагнитной части АЭМП – важная проблема для повышения надежности устройства, освещена в технической литературе недостаточно полно. Общеизвестный закон Монтзингера устанавливает закономерность, при которой превышение

температуры изоляции на 10 градусов сверх максимально допустимой для данного класса изоляции сокращает срок службы изоляции вдвое. Величина и распределение потерь, физические свойства используемых материалов, эффективность стоков теплоты существенно влияют на температурное поле машины и, как следствие, на тепловую стойкость и надежность АЭМП. Следовательно, определение теплового состояния электромагнитного подвеса на стадии проектирования – актуальная задача по совершенствованию АЭМП.

Степень разработанности проблемы

Теоретические основы теории левитации были заложены Ирншоу и В. Браунбеком в начале XX века. В практическое применение теории значительный вклад внесли Д. Бимс, Д. Хризенгер, О.Г. Кальценсон, А.С. Эдельштейн. В.Б. Митлин впервые в отечественной литературе систематизировал виды ЭМП, а под руководством Ю.Н. Журавлева в Псковском политехническом институте создана научно-техническая лаборатория АЭМП. В Германии под редакцией G.Schweitzer, Е.Н. Maslen международным коллективом авторов Н. Bleuler, М. Cole, Р. Keogh, R. Larssonneur, R. Nordmann, Y. Okada, A. Traxler описана теория, конструкция и даны рекомендации по проектированию ЭМП. В работах коллектива авторов ФГУП «НПП ВНИИЭМ»: Верещагина В.П., Сарычева А.П., Рогозы А.В., Руковицына А.В. и др решаются задачи анализа и синтеза систем активного электромагнитного подвеса роторов машин и механизмов наземного и космического использования. В СамГТУ проблемами ЭМП занимаются Макаричев Ю.А., Стариков А.В. и др.

Объектом исследования является радиальный электромагнитный подшипник нагнетателя газоперекачивающей установки магистрального газопровода.

Предметом исследования является распределение потерь, возникающее при работе электромагнитного подшипника, температурное поле и тепловая напряженность его активных элементов.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности активных электромагнитных подшипников путем снижения потерь, исключения локальных перегревов и интенсификации охлаждения, а также повышение точности расчетов на этапе проектирования за счет не учитываемых ранее особенностей их работы.

Задачи исследования:

1. Анализ конструктивных особенностей и специфики работы АЭМП для определения факторов, влияющих на нагрев.

2. Моделирование электромагнитных, газодинамических и тепловых процессов радиального АЭМП с целью уточнения распределения потерь и их локализации.

3. Разработка и анализ конструктивных решений для исключения локальных перегревов и повышения энергоэффективности радиального АЭМП.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использованы аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии. Математическое моделирование электромагнитных, газодинамических и тепловых процессов осуществлялось с использованием аналитических и численных методов расчета физических полей на основе метода конечных элементов.

Научная новизна.

1. Уточнена методика аналитического расчета потерь в электромагнитах АЭМП, отличающаяся учетом потерь от высших пространственных и временных гармоник поля, а также добавочных магнитных потерь, вызванных откликом системы на возмущающее воздействие от вибраций ротора.

2. Предложена методика расчета теплового поля радиального АЭМП нагнетателя ГПА с учетом специфики электромагнитных и газодинамических процессов, происходящих при его работе.

3. Разработана уточненная трехмерная математическая модель газодинамических и тепловых процессов в радиальном АЭМП, отличающаяся учетом турбулентности потоков охлаждающего агента.

Практическая значимость работы определяется тем, что полученные результаты позволяют:

- использовать уточненные значения параметров, полученных аналитическими методами и в результате численного моделирования, для синтеза систем управления электромагнитными подшипниками газонагнетателей мощностью 8 – 25 МВт;

- повысить энергоэффективность АЭМП на 10,8 % за счет снижения наиболее значимых потерь;

- разработанные конструктивные решения позволяют исключить зоны локальных перегревов и, следовательно, повысить надежность АЭМП.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика аналитического расчета потерь в электромагнитах АЭМП, отличающаяся учетом потерь от высших пространственных и временных гармоник поля, а также добавочных магнитных потерь, вызванных откликом системы на возмущающее воздействие от вибраций ротора.

2. Методика и результаты численного моделирования теплового поля радиального АЭМП нагнетателя ГПА с учетом специфики электромагнитных процессов, происходящих при его работе.

3. Трехмерная математическая модель тепловых и газодинамических процессов в радиальном АЭМП, отличающаяся учетом турбулентности потоков охлаждающего агента.

4. Способы снижения тепловой напряженности наиболее нагруженных частей обмоток электромагнитов.

Диссертация соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности: «специальность, объединяющая исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии <...> комплексные исследования научно-технических, производственных и технологических проблем проводятся с целью повышения энергетической эффективности, технологичности и эксплуатационной безопасности преобразователей и аппаратов...»; в части области исследований: п.2. «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов»; п.3. «Разработка методов анализа и синтеза преобразователей электрической и механической энергии».

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации обеспечена строгим выполнением математических преобразований, принятием признанных допущений, использованием современных математических моделей и пакетов программ. Адекватность результатов и выводов подтверждается согласованностью с опубликованными результатами работ других авторов и численным моделированием на 3D моделях.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях:

Международная научно-технической конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XXVII Бернадосовские

чтения), 2013 г.; Международная научно техническая конференция «Мехатроника и автоматизация», 2014 г.; VIII Международная (XIX Всероссийская конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2014) 2017 г.; Второй Всероссийский форум «Наука будущего – наука молодых», 2016 г.; Ашировские чтения. Международная научно-практическая конференция, 2018 г.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационного исследования использовались при выполнении НИР «Математическое обеспечение системы управления электромагнитными подшипниками ротора нагнетателя газоперекачивающего агрегата» с ООО Фирма «Калининградгазприборавтоматика» г. Калининград, в которой автор участвовал в качестве исполнителя, в части создания математической модели ЭМП СУМП-М «Неман-100». Указанные результаты способствовали увеличить надежность агрегата и сократить число плановых и аварийных простоев ГПА.

Результаты диссертации в виде математических и имитационных моделей используются в учебном процессе Самарского государственного технического университета при подготовке бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика и электротехника» в курсе специальных электрических машин.

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них одна работа индексируется в базе данных Scopus, 5 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 95 наименований, приложения и содержит 141 страниц основного текста, 53 рисунка и 10 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Макаричеву Юрию Александровичу за конструктивную критику и содействие при работе над диссертацией.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

Объектом исследования является радиальный АЭМП газонагнетателя ГПА.

В первой главе проведен анализ устройства и принцип действия активного электромагнитного подшипника, рассмотрены основные конструктивные схемы. В общем случае один комплект АЭМП состоит как минимум из двух радиальных электромагнитных подшипников, ограничивающих перемещение ротора в радиальном направлении и одного осевого электромагнитного подшипника, ограничивающего перемещение в аксиальном направлении. Электромеханическая часть радиального АЭМП состоит из магнитопровода статора и ротора, катушек электромагнитов и страховочных подшипников. В работе рассматривается конструкция АЭМП с поперечным направлением магнитного потока и с внешним по отношению к ротору индуктором с сосредоточенными полюсами. Особенности такой конструкции являются: большая амплитуда намагничивающей силы полюса, несимметричность и несинусоидальность знакопеременного магнитного поля в зазоре. В результате чего в теле шихтованного магнитопровода ротора (цапфы) возникают значительные потери на перемагничивание и вихревые токи. Эти потери оказывают существенное влияние не только на нагрев ротора, но и на тепловое состояние обмоток электромагнитов.

На существующих газоперекачивающих станциях в последнее время традиционные масляные подшипники заменяются на системы АЭМП. Использование АЭМП взамен масляных подшипников за счет исключения механического контакта между вращающимися деталями позволяет отказаться от сети масляных магистралей, маслонасосов и вспомогательного оборудования подшипников. За счет этого снижается потребление электроэнергии, а также число отказов, вызванных сбоем в маслосистеме, оборудовании КИПиА, и повышается надежность ГПА в целом.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей и анализу режимов работы и потерь, возникающих в активных частях АЭМП.

В электромагнитном подшипнике в номинальном режиме работы практически вся потребляемая электрическая энергия идет на нагрев обмоток, магнитопроводов статора и ротора. Кроме того, АЭМП потребляет часть механической мощности ротора ГПА, также преобразующейся в тепло.

Основные электрические потери, выделяемые в проводниках обмотки электромагнитов, были определены на основании общеизвестного закона Джоуля-Ленца.

Потери на трение о воздух, выделяющиеся в виде тепла на вращающихся поверхностях, оказывают существенное влияние на суммарные потери с увеличением частоты вращения ротора. В общем случае потери на трение о воздух зависят от большого количества факторов и были определены аналитически с использованием критериев подобия.

В традиционной инженерной практике для определения потерь в роторе в результате вращения в магнитном поле электромагнитов используется следующая зависимость:

$$\Delta P_{пот} = \Delta p_{1/400} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{400} \right)^\beta \cdot \frac{m}{2}. \quad (1)$$

Где в качестве активной массы стали цапфы учитывается только половина от реальной величины в результате допущения о незначительности выделяемых потерь в секторе цапфы, расположенном у «нижних» полюсов.

Зависимость (1) справедлива для синусоидального изменения величины магнитного потока и не учитывает потери, вызванные высшими гармоническими. Поэтому для уточнения потерь на «магнитное» трение было проведено численное моделирование методом конечных элементов. Расчет потерь на гистерезис в программной среде *Ansys Maxwell* позволяет учитывать перемагничивание стали по частичным циклам, исходя из полученной площади петли гистерезиса, а расчет потерь на вихревые токи основывается на определении вихретоковой компоненты уравнения Штейнмеца:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_h + \Delta P_e + \Delta P_{ex} = k_h \cdot f^\beta \cdot B^\alpha + k_e \cdot f^2 \cdot B^2 + k_{ex} \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5} \quad (2)$$

где ΔP_h – потери на перемагничивание, ΔP_e – потери на вихревые токи, эмпирические коэффициенты (обычно не целочисленные) α , β лежат в пределах: $2 < \alpha < 3$, $1 < \beta < 3$; k_h – поправочный коэффициент потерь на гистерезис, k_e – поправочный коэффициент потерь на вихревые токи, k_{ex} – поправочный коэффициент добавочных потерь.

На рис.1 представлена кривая нормальной составляющей магнитной индукции в зазоре на протяжении половины длины окружности воздушного зазора.

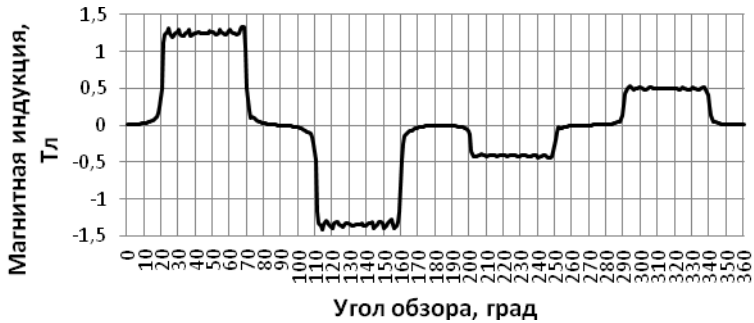


Рисунок 1 – Нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре

Из рис.1 видно, что ротор радиального АЭМП вращается в знакопеременном магнитном поле. Гармонический анализ кривой показал значительное влияние нечетных гармоник на кривую распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

На рис.2 представлена картина распределения удельных потерь по сечению ротора радиального АЭМП.

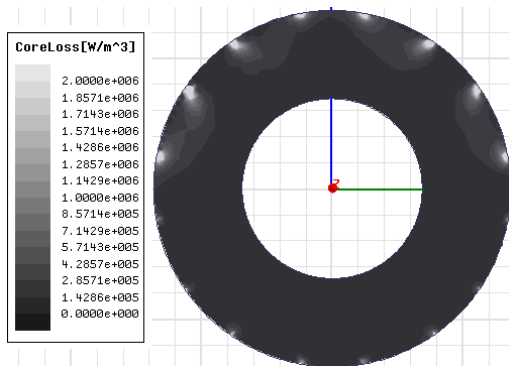


Рисунок 2 – Удельные потери в теле цапфы на перемагничивание и вихревые токи

В результате аналитического расчета найдены основные потери в меди катушек электромагнитов и потери в роторе на трение о воздух. В результате численного моделирования методом конечных элементов МКЭ найдена величина потерь в роторе на «магнитное трение», а также потери в стали в результате отклика системы управления на пере-

мещение ротора и потери от широтно-импульсной модуляции (ШИМ) питающего напряжения.

По результатам моделирования и анализа электромагнитных процессов радиального электромагнитного подшипника установлено, что основную долю потерь (до 69% в номинальном режиме и 54 % в режиме максимальной нагрузки) в радиальном АЭМП составляют потери на перемагничивание и вихревые токи в цапфе, вызванные вращением сердечника ротора в знакопеременном магнитном поле. Установлена величина потерь, выделяемых в стали на гистерезис и вихревые токи в результате отклика системы управления на отклонение ротора и потери от ШИМ, которая в номинальном режиме составила порядка 2 % от общих потерь радиального АЭМП.

В третьей главе разработана трехмерная математическая модель (рис.3) тепловых и газодинамических процессов в радиальном АЭМП, отличающаяся учетом турбулентности потоков охлаждающего агента. Решение тепловой и газодинамической задачи осуществлялось методом конечных элементов.

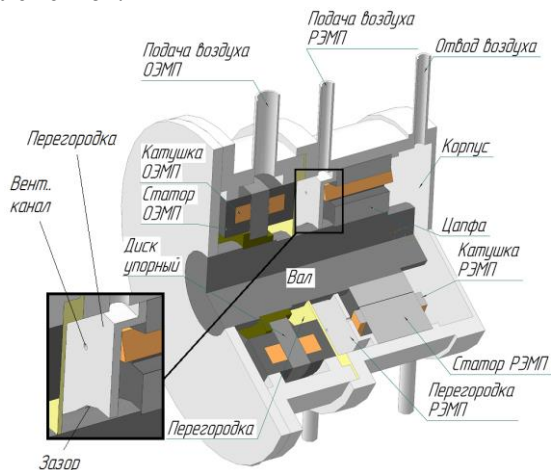


Рисунок 3 – Трехмерная геометрическая модель радиального АЭМП
ГПА

Основой численного моделирования тепловой задачи являлось дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\nabla(\lambda \nabla T) + \frac{\Delta P}{V_a} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

где ∇ – оператор набла; ΔP – тепловыделения в теле объемом V_a ; ρ, c –

плотность и теплоемкость материалов. При определении максимальной температуры обмоток рассматривалась стационарная постановка задачи. Для численного моделирования температурного поля АЭМП использовалось граничное условие IV рода, которое описывает изменение теплового потока при контакте двух твердых тел имеющих соответственно теплопроводности λ_1 и λ_2 :

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right), \quad (4)$$

и граничное условие III рода, описывающее интенсивность теплообмена на границе сред $\alpha(x, y)_{sp}$:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{sp} = \alpha (T_{sp} - T_0). \quad (5)$$

Коэффициенты теплопроводности блоков модели задавались исходя из теплопроводности соответствующих материалов. Теплопроводность гетерогенных тел (катушки электромагнитов, магнитопровод поперек шихтовки) задавалась эквивалентным коэффициентом теплопроводности, полученным на основании аналитических расчетов.

Радиальный АЭМП нагнетателя имеет принудительную систему охлаждения. Коэффициент теплоотдачи с поверхности (α) в уравнении (5) является функцией множества переменных. Основой механики движения газов и жидкостей с учетом сжимаемости среды является уравнение Навье-Стокса (6) в общем виде, дополненное уравнением неразрывности (7) и состояния (8):

$$\begin{cases} \rho \frac{Du}{Dt} = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathfrak{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \frac{D\vartheta}{Dt} = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial \vartheta}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathfrak{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{Dw}{Dt} = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathfrak{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

где $\mathfrak{V} = \mathbf{i}u + \mathbf{j}\vartheta + \mathbf{k}w$ – вектор скорости; u, v, w – проекции вектора скорости на оси прямоугольной системы координат; $\frac{D}{Dt}$ – субстанциональная производная, которая складывается из локальной производ-

ной, учитывающий нестационарный характер течения и конвективной производной, учитывающей перемещение частицы; X, Y, Z – проекции массовых сил на оси прямоугольной системы координат.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

$$p - \rho RT = 0 \quad (8)$$

где R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, ρ – плотность, λ – теплопроводность, ν – кинематическая вязкость, c – теплоемкость теплоносителя.

На основании величины числа Маха рассматриваемой среды было сделано допущение о несжимаемости охлаждающего агента. В качестве программного обеспечения для решения газодинамической задачи использовался пакет программ *Ansys Fluent*.

С учетом особенностей исследуемой геометрической модели в качестве модели турбулентности для определения коэффициента теплоотдачи с поверхности была выбрана модель *Standard k- ω* . Для удовлетворительного разрешения течения в пограничном слое толщина первой ячейки сетки была найдена из уравнения:

$$y^+ = \frac{\Delta y}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (9)$$

где y^+ – безразмерная величина, характеризующая расстояние до стенки. В модели *k- ω* рекомендуется принять её $y^+ < 1$; Δy – расстояние от середины первой ячейки до стенки; τ_w – касательное напряжение на стенке:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Big|_{y=0}$$

Решение газодинамической задачи в виде коэффициента теплоотдачи на поверхности послужило граничным условием для тепловой задачи радиального АЭМП.

Для оценки влияния температуры цапфы на температурное состояние обмоток электромагнитов было проведено моделирование температурных полей с пренебрежением потерями, выделяющимися в цапфе и с учетом тепловыделений в цапфе. Моделирование проводилось для предельно допустимого по величине тока режима работы радиального АЭМП. В результате установлено влияние величины тепловыде-

лений в роторе на температурное состояние обмоток электромагнитов. На рис.4 представлено температурное поле радиального АЭМП.

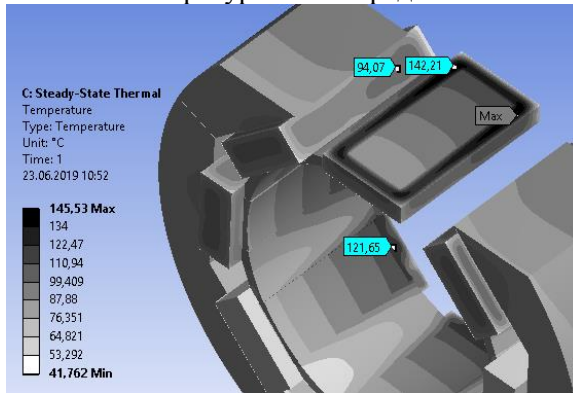


Рисунок 4 – Температурное поле радиального АЭМП

Из рис.4 видно, что температура распределена неравномерно по сечению катушки полюса. Максимальная температура обмоток составила $T_{max} = 145,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Математическая модель тепловой задачи, решенная в трехмерной постановке, показала, что учет подогрева обмоток электромагнитов за счет потерь, выделяющихся в роторе, является обязательным. В противном случае, погрешность по температуре в наиболее нагретых катушках может достигать 24°C , что недопустимо.

В четвертой главе произведен анализ возможных путей совершенствования температурного состояния радиального АЭМП.

Из анализа результатов численного моделирования электромагнитных процессов радиального АЭМП установлено, что аналитическая формула (1) дает значительно заниженную величину потерь в роторе на «магнитное трение», для аналитического определения этих потерь предложена следующая зависимость:

$$\Delta P_{en} = \Delta p_{1/400} \cdot m_a \cdot \sum_{v=1}^N \left(B_{u,v}^2 \cdot \left(\frac{f_1 \cdot v}{f_{ном}} \right)^\beta \cdot \xi_v \right) \quad (10)$$

где ξ_v – коэффициент, учитывающий вытеснение потока, v – номер высшей гармонической.

Формула (10) отличается учетом потерь на высшие гармонические и учитывает близкое к реальному распределение индукции в цапфе ротора.

Для снижения потерь на «магнитное трение» предложено за счет придания полюсу соответствующей формы добиться максимально возможного приближения формы кривой индукции в зазоре к синусоидальной. Для этого был увеличен воздушный зазор под краями полюсов и найдена зависимость потерь на «магнитное трение» в функции величины воздушного зазора под краем полюса. Расчеты проводились по формулам 1 и 10, и сравнивались с результатами численного моделирования.

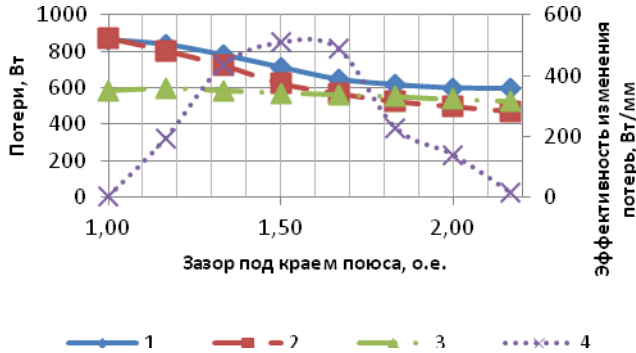


Рисунок 5 – Зависимость потерь на магнитное трение от величины воздушного зазора под краем полюса 1 – численное моделирование; 2 – по формуле 10; 3 – по формуле 1; 4 – эффективность профилирования полюса.

Из анализа результатов видно, что с увеличением величины зазора под краем полюса потери в цапфе уменьшаются. Аналогичные результаты получены по формуле 10. Расхождение результатов объясняется повышением потерь при насыщении, чего не учитывает формула 10. Потери, рассчитанные по формуле 1, не учитывают потери от высших гармоник, поэтому они практически не изменяются. Эффективность от увеличения величины зазора под краем полюса может быть оценена по кривой (4) на рис.2, которая показывает относительное изменение потерь в зависимости от зазора (Вт/мм):

$$\xi_i = \frac{P_{i-1} - P_i}{\delta_i - \delta_{i-1}}$$

График имеет максимум при величине зазора под краем полюса равной $\delta_m = (1,5 \dots 1,67)\delta_{ном}$, дальнейшая эффективность от увеличения зазора снижается.

На рис.6 представлена диаграмма наиболее значимых потерь радиального АЭМП и изменение потерь в результате профилирования

полюса. За базу взята конструкция с равномерным зазором. Вклад наиболее значимых потерь оценивался как отношение к общим потерям, выделяющимся в номинальном режиме. В конструкции с профилированием полюса моделирование проводилось в модели со скорректированной осевой длиной подшипника.

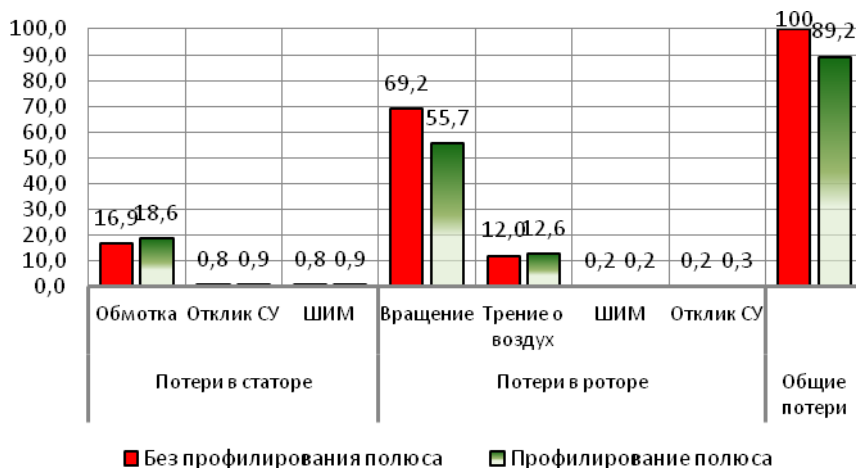


Рисунок 6 – Наиболее значимые потери радиального АЭМП

Из рис.6 видно, что за счет увеличенной осевой длины подшипника потери в меди и на трение о воздух возрастают незначительно (на 1,7 % и на 0,6 %), а магнитные потери в роторе снижаются на 13,5 %. В результате предложенных мер уменьшение полных потерь радиального АЭМП при профилировании полюса составило 10,8 %.

Далее был проведен анализ возможности применения испарительной системы охлаждения, реализованной в виде термосифона в полости вращающегося ротора или введением тепловых трубок в цапфу ротора. Анализ результатов показал, что применение термосифонов для охлаждения цапфы ротора радиального АЭМП наиболее эффективно в конструкции с применением стальной рубашки, выполненной из немагнитной стали. Использование медных трубок, установленных непосредственно в тело цапфы не желательно из-за возникающих при работе ЭМП пульсаций подъемной силы.

За счет предложенных мер по снижению потерь в электромагнитах и совершенствования системы теплоотвода возможно снижение

массы и габаритов АЭМП, или повышение их грузоподъемности при неизменной потребляемой мощности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что упрощенные аналитические методики не позволяют с достаточной точностью учесть все особенности несинусоидального в пространстве и времени магнитного поля, вызывающего магнитные потери в роторе радиально АЭМП. Аналитический расчет потерь на «магнитное трение» должен дополняться учетом потерь, возникающих от высших гармонических в АЭМП с учетом несинусоидальности кривой магнитного поля в зазоре.

2. Основную долю потерь (до 69% в номинальном и 54% в режиме максимальной нагрузки) в радиальном АЭМП составляют потери на перемагничивание и вихревые токи в цапфе, вызванные вращением сердечника ротора в неравномерном магнитном поле.

3. Учет подогрева обмоток электромагнитов за счет потерь, выделяющихся в роторе, является обязательным. В противном случае, погрешность по температуре в наиболее нагретых катушках АЭМП газонагнетателя может достигать 24°C, что недопустимо.

4. Для снижения добавочных магнитных потерь в цапфе ротора целесообразно профилирование полюсов (увеличение воздушного зазора под краем полюса) с целью приближения формы кривой магнитной индукции в зазоре к синусоидальной. Профилирование полюсов позволяет снизить величину основных и добавочных магнитных потерь на 17,6 %.

5. В результате проведенных исследований и предложенных рекомендаций энергетическая эффективность радиального АЭМП газонагнетателя повышена на 10,8 % (потребляемая мощность системы снижена на 0,135 кВт на один подшипник).

6. Для интенсификации теплоотвода целесообразно использовать активные испарительные системы охлаждения в виде тепловых трубок и термосифонов. Наиболее рациональной испарительной системой теплоотвода следует признать конструкцию с использованием стальной рубашки из нержавеющей стали с аксиальными отверстиями под теплоноситель.

7. В результате проведенных исследований установлено, что интенсификация теплоотвода позволяет снизить температуру наиболее нагретых точек и за счет этого уменьшить массу и габариты ЭМП, или повысить их грузоподъемность при той же потребляемой мощности.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшая разработка темы может быть направлена на совершенствование испарительной системы охлаждения с учетом специфики условий работы АЭМП, уточнение газодинамических процессов, происходящих в термосифоне – в части совершенствования тепловых процессов, оптимизации массогабаритных показателей АЭМП за счет снижения основных потерь и максимальной температуры в катушках электромагнитов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS/Web Of Science

1. Low - power wind generator / A.S. Anufriev [et al] // International Conference on Information Networking Volume 2018-January, 19 April 2018, Pages 671-672. 32nd International Conference on Information Networking, ICOIN 2018; Holiday Inn Chiang Mai Chiang Mai; Thailand; 10 January 2018 - 12 January 2018.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации

2. **Иванников Ю.Н.** Постановка задачи численного моделирования газодинамических процессов охлаждения электрических подшипников ГПА / Ю.Н. Иванников, Ю.А. Макаричев // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №4(60) – 2018. С.102-112.

3. Макаричев Ю.А., **Иванников Ю.Н.** Моделирование температурных полей радиального электромагнитного подшипника // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» №3(43) – 2014. С.139-145.

4. Макаричев Ю.А. Моделирование нестационарного магнитного поля в электромагнитных подшипниках высокоскоростных электрошпинделей / Ю.А. Макаричев, А.В. Стариков, **Ю.Н. Иванников** // Вестник МГТУ «Станкин» «Информатика,

вычислительная техника и управление» №3(38) – 2016. с. 87-91.

5. Макаричев Ю.А. Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки / Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, **Ю.Н. Иванников**, И.В. Гуляев // *Электротехника* №7 – 2019. С. 24 – 32.

6. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., **Иванников Ю.Н.** Исследование тепловых процессов автономного генератора совмещенного типа методом моделирования температурных полей // *Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки»*. 2015. №4(48) . С.93-100.

Работы в других журналах и материалах научных конференций

7. Динамические потери радиального электромагнитного подшипника газоперекачивающего агрегата / **Ю.Н. Иванников** [и др.] // *Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции.* / Отв. редактор В.В. Живаева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018 – 380с. 377-380 с.

8. **Иванников Ю.Н.** Активные электромагнитные подшипники электрошпинделей / Ю.Н. Иванников, Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков // В Сборнике тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» - Казань, 2016. – Том 1, 454 с., с.409-411.

9. Макаричев Ю.А. Расчет магнитного поля и параметров осевых электромагнитных подшипников / Ю.А. Макаричев, **Ю.Н. Иванников**, М.Н. Алимбеков // *Труды VIII Международной (XIX Всероссийской конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014.* –Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. т.1. С.278-283.

10. **Иванников Ю.Н.** Моделирование температурных полей радиального электромагнитного подшипника / Ю.Н. Иванников // В сб. докладов 52 международной н.с. конф. «Мехатроника и автоматизация»- Новосибирск, 2014. - С.49.

11. Макаричев Ю.А. Моделирование параметров электромагнитных подшипников газоперекачивающих агрегатов / Ю.А. Макаричев, **Ю.Н. Иванников** // *Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (XXVII Бернадосов-*

ские чтения), III том.- ФГБОУ ВПО «ИГЭУ». – Иваново, 2013. С.90-94.

Личное участие автора

Все основные положения диссертации разработаны автором лично. В работах [1, 2, 7, 8, 9, 11] Иванникову Ю.Н. принадлежат: анализ идеи, постановка и реализация задач, обработка результатов, в работах [3 – 6] Иванникову Ю.Н. принадлежат: численные эксперименты по расчету электромагнитных и тепловых процессов, обработка результатов.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета
Д 212.217.04 ФГБОУ ВО «Самарский государственный техни-
ческий университет»

(протокол № 7 от 1 октября 2019 г.)

Заказ № ___ Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический универ-
ситет»

Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244