

На правах рукописи



ВЛАСОВ Алексей Михайлович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ
ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)

Научный руководитель: **Казаков Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Саушев Александр Васильевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой «Электропривод и электрооборудование береговых установок»;

Топоров Алексей Валериевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», доцент кафедры «Механика, ремонт и детали машин».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита состоится «21» сентября 2022 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» http://ispu.ru/files/1_Dissertaciya_Vlasov_A.M..pdf

Автореферат диссертации размещён на сайте ИГЭУ: www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02,
канд. техн. наук, доцент



Копылова
Лариса Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения безопасной эксплуатации электродвигателей (ЭД) в системах регулируемого привода во взрывоопасных и загрязненных зонах, при воздействии агрессивных сред, в условиях перепада давлений между внутренним объемом ЭД и внешней средой, вплоть до вакуума, изменения температуры, частоты вращения и нагрузки. Для работы в таких условиях применяют специальные ЭД с повышенной степенью герметизации: взрывозащищенные, искробезопасные, рудничные, шахтные, ЭД насосов, вакуумных установок и др. В целях повышения прочности корпуса подшипниковые щиты в этих ЭД выполняют чугунными или стальными. Применяемые механические уплотнения вращающихся валов часто не обеспечивают достаточную пыле/газогерметичность валов таких ЭД, не допускают регулирование степени герметизации при изменении условий и режима работы.

Эффективно применение магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) - бесконтактных уплотнений с гидравлическим затвором магнитной жидкостью (МЖ), которая удерживается магнитным полем в зазоре между неподвижным полюсом и вращающимся валом. МЖГ обеспечивают практически абсолютную герметичность, обладают «самозалечиванием» после пробоя, не требуют смазки, способны выталкивать из себя влагу и немагнитные частицы, что снижает износ вала, имеют повышенный ресурс. Однако применяемые в настоящее время МЖГ рассчитаны на работу в номинальных установившихся режимах. Применение МЖГ в регулируемых ЭД в ненормальных режимах, условиях с изменением частоты вращения, воздействующего перепада давлений, температуры требует дополнительных исследований. В ЭД с магнитопроводящими щитами на работу МЖГ могут оказывать электромагнитные процессы в ЭД, вызывать изменение магнитоэлектрических, вязкостных и теплофизических свойств МЖ.

При изменении режима и условий работы целесообразно управление и настройка свойств уплотнительной системы ЭД. В распространенных МЖГ используются постоянные магниты, у них затруднено изменение магнитного потока, что осложняет управление свойствами МЖГ. Для повышения эффективности герметизации регулируемых ЭД целесообразно применение управляемых МЖГ и, в целом, электротехнической системы с возможностью изменения свойств системы при изменении режимов и условий работы.

Степень разработанности проблемы. Разработка специальных регулируемых ЭД проводится в ПАО НИПТИЭМ, системы герметизации ЭД совершенствуют в УГАТУ. Электромеханические устройства с МЖ описаны учеными МЭИ (Копылов И.П.), МАИ (Алиевский Б.Л.). Магнитожидкостную смазку для двигателя-маховика применяют в ВНИИЭМ. Электротехнические системы виброзащиты на основе МЖ демпферов с управляемыми магнитоэлектрическими свойствами развивают в СамГТУ. Электромеханический преобразователь с управляемым движением ферромагнитных частиц в нефти разрабатывают в ЮРГПУ. Применение МЖГ для повышения безопасности устройств исследуют в ИПСА ГПС МЧС РФ. Исследования МЖ герметизации проводились Орловым Д.В., Страдомским Ю.И., Казаковым Ю.Б., Морозовым Н.А., Сизовым А.П., Полетаевым В.А. (Иваново); Масловым П.П. (Новосибирск); Радионовым А.В.

(Украина); Баштовым В.Г., Краковым М.С. (Белоруссия); учеными Y. Chen, W. Horak, M. Szczech, D. Li, R. Zheng, Y. Zhang. Однако к настоящему времени отсутствует системные решения по разработке и применению в регулируемых ЭД управляемой магнитожидкостной герметизации, конструкций регулируемых МЖГ, функциональных схем, моделей, алгоритмов и программ управления системой. В связи с этим разработка и исследование электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых ЭД представляет актуальную научно-техническую задачу.

Объект исследования – электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей.

Предмет исследования – электромагнитные и электромеханические процессы в электротехнической системе в различных режимах.

Цель диссертации – повышение эффективности герметизации регулируемых электродвигателей путем изменения свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы на основе применения электротехнической системы с управляемым магнитожидкостным герметизатором.

Задачи, решаемые в работе:

1. Анализ применимости магнитожидкостных систем для герметизации валов регулируемых электродвигателей в различных режимах и условиях, при разнообразных внешних воздействиях;

2. Разработка электротехнической системы управляемой магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей с повышенной эффективностью уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы для безопасной эксплуатации электродвигателей;

3. Выбор способа, средств управления, обоснование условий регулирования, разработка алгоритма и программы управления, имитационных моделей электротехнической системы магнитожидкостной герметизации электродвигателей;

4. Уточненное моделирование компонентов и расчетные исследования свойств электротехнической системы магнитожидкостной герметизации;

5. Практическая реализация и экспериментальные исследования системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены с использованием методов теории электротехники. Расчетные исследования выполнены в пакетах Mathcad и Excel, имитационное моделирование - в системе LabView, твердотельное моделирование - в средах Solidworks и AutoCad, численное моделирование физических полей - в комплексах ElCut и ANSYS, экспериментальные исследования - с использованием физического моделирования и натурального эксперимента, обработка результатов исследований - с использованием методов планирования эксперимента.

Научная новизна

1. Разработана электротехническая система герметизации валов регулируемых электродвигателей, отличающаяся применением управляемых магнитожидкостных герметизаторов и изменением свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий, режимов и условий работы.

2. Разработаны способ, алгоритм, условия и программа управления системой

магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, отличающиеся возможностью управления свойствами герметизаторов для безопасной эксплуатации электродвигателей.

3. Разработаны компьютерные и имитационные модели компонентов электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, отличающиеся учетом влияния электромагнитных процессов в электродвигателе, свойств герметизатора, частоты вращения, магнитных и жидкостных свойств магнитной жидкости, перепада давлений, температуры.

Практическая ценность работы

1. Разработанная электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, предложенный способ, средства, алгоритм и программа управления позволяют осуществлять регулируемое изменение уплотнительных свойств системы при изменении режима и условий работы электродвигателей, внешних воздействий.

2. Разработанные модели компонентов и имитационные модели электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей позволяют проводить уточненный анализ эффективности герметизации с учетом электромагнитных процессов в электродвигателе, частоты вращения вала, магнитного состояния герметизатора, магнитных и жидкостных свойств магнитной жидкости, перепадов давлений, температуры.

3. Предложенные конструктивные решения позволяют реализовать управляемую электротехническую систему магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, снизить момент трения герметизаторов, повысить ресурс и надежность, безопасность эксплуатации электродвигателей.

4. Разработанный магнитожидкостный герметизатор вала взрывозащищенного двигателя ВРАБ225 может быть применен для других электродвигателей.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, структура, схема функционирования, компьютерные модели компонентов и имитационные модели системы с учетом электромагнитных процессов в электродвигателе, изменения частоты вращения вала, магнитных и жидкостных свойств магнитной жидкости, перепада давлений и температуры, изменения магнитного потока.

2. Способ, средства, условия, алгоритм и программа управления электротехнической системой магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей при изменении внешних воздействий и режимов работы.

3. Конструктивные решения управляемых магнитожидкостных герметизаторов валов регулируемых электродвигателей со сниженным моментом трения герметизаторов, повышенным ресурсом и надежностью.

4. Результаты исследований свойств и характеристик электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Соответствие диссертации паспорту специальности 05.09.03: *по формуле специальности:* «... исследования по общим закономерностям преобразования ... электрической энергии, ... принципы и средства управления объектами ... Элек-

тротехнические системы ... должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование ... в широком диапазоне внешних воздействий»; *по области исследования*: п.1 «... физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических ... систем»; п.3 «Разработка ... электротехнических ... систем ..., алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности ... электротехнических ... систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях ...»; п.5 «Разработка безопасной и эффективной эксплуатации ... электротехнических... систем».

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов обусловлена использованием строгих математических методов, компьютерным моделированием на основе применения распространенных программных систем.

Адекватность результатов подтверждается согласованностью с опубликованными результатами, удовлетворительным совпадением с результатами физического моделирования, внедрением и использованием результатов.

Результаты диссертации внедрены на Ярославском АО «ЭЛДИН» для взрывозащищенного ЭД и в учебном процессе ИГЭУ в дисциплине «Специальные электромеханические устройства».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждены на Международных научно-технических конференциях: «International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)» (Russia, Chelyabinsk, 2020), «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты» (МКЭЭЭ-2020), «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, ИГЭУ, 2013, 2015, 2017, 2019 гг.), Плесских научных конференциях по нанодисперсным магнитным жидкостям (2016, 2018, 2020 гг.); Всероссийских конференциях: «Электроэнергетика глазами молодежи» (ИГЭУ, 2013 г.), «ЭНЕРГИЯ» (Иваново, ИГЭУ, 2013, 2015 гг.), «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 2015 гг.), «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, 2017, 2018 гг.), «Машиноведение и инновации» (МИКМУС-2017, Москва, ИМФШ РАН) и др.

По материалам диссертации опубликованы 25 работ, из них: 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ; 1 статья индексирована в БД Scopus; 3 патента на изобретения; 1 свидетельство на программу ЭВМ.

Структура работы. Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы, включающий 122 наименования, приложения. Основная часть изложена на 149 страницах и содержит 99 рисунков и 25 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе проведен анализ применимости магнитожидкостных систем герметизации валов для регулируемых ЭД. На основе анализа публикаций выявлено, что техногенный риск уплотнительной системы ЭД с механическими уплотнениями повышается при переходе от продолжительного к повторно-кратковременному режиму, замена сальникового уплотнения на МЖГ позволяет снизить риск нарушения герметизации в 4-7 раз. Представлены нелинейные магнито- и

термозависимые вязкостные свойства МЖ. Отмечено, что при изменении частоты вращения ЭД квадратично изменяются вязкостные потери в МЖ и ее разогрев, при предельной температуре МЖ происходит потеря герметизирующих свойств МЖГ. Указано, что изменение нагрузки ЭД и электромагнитных процессов в нем, вызывает изменение магнитного потока рассеяния лобовых частей обмоток, который через подшипниковый щит может воздействовать на МЖГ. Отмечено, что регулирование свойств МЖГ возможно путем изменения магнитного потока в МЖГ в зависимости от частоты вращения и перепада давлений с помощью дополнительных токовых обмоток. Сделан вывод об актуальности разработки, исследования и применения управляемой электротехнической системы магнито-жидкостной герметизации валов регулируемых ЭД для их безопасной эксплуатации с выработкой функциональных схем, моделей, разработкой алгоритмов и программ управления со свойством адаптируемости уплотнительной системы к изменению режимов и условий работы ЭД, внешних воздействий.

Вторая глава посвящена разработке электротехнической системы управляемой магнито-жидкостной герметизации валов регулируемых ЭД.

Критический удерживаемый перепад давлений одним зубцом МЖГ при вращении вала ЭД с окружной скоростью МЖ $v_{\text{МЖ}}$

$$\Delta p_{v, \text{кр.МЖГ}} = \Delta p_{\text{ст.кр.МЖГ}} - \rho_{\text{МЖ}} v_{\text{МЖ}}^2 \delta / D, \quad (1)$$

где $\Delta p_{\text{ст.кр.МЖГ}} = \mu_0 \int_{H_{\text{min}}}^{H_{\text{max}}} M dH \cong M(B_{\text{max}} - B_{\text{min}})$ – удерживаемый перепад давлений в статическом режиме, M – намагниченность МЖ, при насыщении M_s – намагниченность насыщения; H_{min} , B_{min} – минимальные, H_{max} , B_{max} – максимальные магнитные напряженности и индукции в МЖ; $\rho_{\text{МЖ}}$ – плотность МЖ, D – диаметр вала, $\delta = r - R$ – зазор между валом радиусом $R = D/2$ и полюсом радиусом r .

Система магнито-жидкостной герметизации вала должна обеспечивать $\Delta p_{v, \text{кр.МЖГ}} > \Delta p_{\text{внеш}}$, где $\Delta p_{\text{внеш}}$ – внешний воздействующий перепад давлений. При повышении $\Delta p_{\text{внеш}}$ возможно увеличить $\Delta p_{v, \text{кр.МЖГ}}$ дополнительным магнитным потоком, например, от подмагничивающей обмотки с током, изменяемым по сигналу датчика $\Delta p_{\text{внеш}}$. При увеличении частоты вращения n двигателя и $v_{\text{МЖ}}$ повышается центробежная сила, стремящаяся оторвать МЖ от вала, и при критической $v_{\text{МЖ,кр}}$ герметизация нарушается. Для удержания МЖ необходимо повышать действующую на нее магнитную силу, например, дополнительным магнитным потоком от подмагничивающей обмотки с током, изменяемым по сигналу датчика n .

Для герметизации вала регулируемого ЭД разработан патентозащищенный управляемый МЖГ (рис. 1): немагнитный корпус 1; кольцевой магнит 2, создающий магнитный поток $\Phi_1 = \Phi_{\text{пм}}$; два магнитопроводящих зубчатых полюсных наконечника 3 и 4; вал 6; уплотняемые зазоры 5 с МЖ; датчик температуры МЖ 13; в магнитопроводящих корпусах 11 и 12 две кольцевые обмотки с катушками 7,8 и 9,10, соединенные одна с датчиком $\Delta p_{\text{внеш}}$, другая с датчиком n , с токами I_p и I_n , создающие магнитные потоки $\Phi_2 = \Phi_p$ и

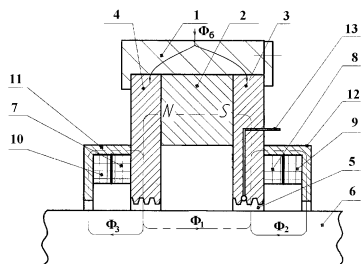


Рис. 1. Управляемый МЖГ

$\Phi_3 = \Phi_n$ для регулирования результирующего магнитного потока в зазоре МЖГ.

Разработана структура системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых ЭД и схема ее функционирования (рис. 2).

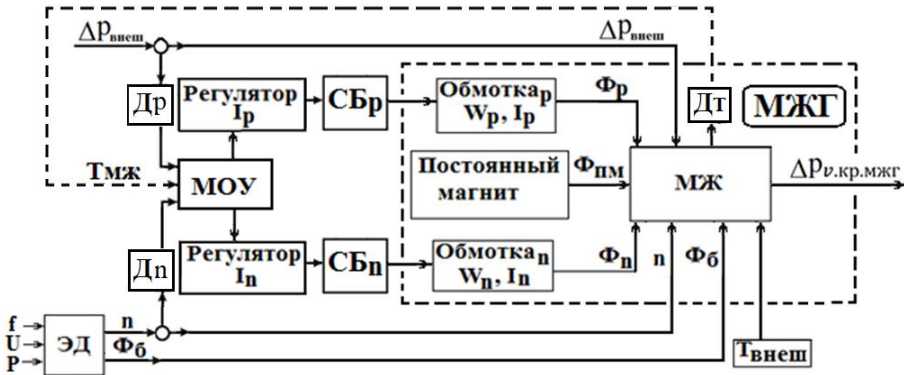


Рис. 2. Схема функционирования электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей

В структуре системы отражены: регулируемый ЭД, работающий, возможно, от преобразователя частоты; управляемый МЖГ с обмотками; магнит, обеспечивающий магнитный поток $\Phi_{пм}$, необходимый для удержания МЖ в МЖГ при останове ЭД; датчик $\Delta P_{внеш}$ Др; датчик n Дн; датчик температуры Дт для контроля температуры МЖ $T_{мж}$ с учетом воздействия внешней температуры $T_{внеш}$. Сигналы с датчиков Др, Дн и Дт обрабатываются в блоке «Модель объекта управления» (МОУ) и в виде управляющих воздействий задаются в регуляторы токов I_p и I_n и после усиления в блоках СБ подаются в «обмотку(р)» с числом витков W_p и током I_p , который вызывает магнитный поток Φ_p , и «обмотку(н)» с числом витков W_n и током I_n , который вызывает магнитный поток Φ_n . Разработана электрическая схема регулирования I_p и I_n в зависимости от сигналов датчиков. Изменение нагрузки ЭД P , питающего напряжения U частоты f изменяют ток ЭД $I_{эд}$, электромагнитные процессы в ЭД и поток рассеяния $\Phi_б$, проникающий в МЖГ и дополнительно воздействующий на МЖ.

Изменение I_p и I_n происходит с малой электромагнитной постоянной времени обмоток. МЖ практически мгновенно откликается на изменение магнитного потока. В то же время газодинамическая постоянная времени при изменении $\Delta P_{внеш}$ значительно превышает электромагнитную постоянную времени обмоток. Электромеханическая постоянная времени изменения n ЭД также существенно превышает электромагнитную постоянную времени обмоток. Поэтому функциональные звенья регулирования магнитного поля в МЖГ по сигналам с Др и Дн можно считать безынерционными.

Разработанная конструкция управляемого МЖГ, выбранные способ, средства и схема управления позволяет реализовать управляемую электротехническую систему магнитожидкостной герметизации валов регулируемых ЭД и обеспечивают изменение характеристик МЖГ при изменении режима работы.

В третьей главе рассмотрены системные связи элементов, разработаны модель и алгоритм управления, выполнено имитационное моделирование системы.

Системные связи элементов проявляются через влияние электромагнитных процессов в ЭД, магнитных потоков регулирующих обмоток на работу МЖГ. Торцевой поток рассеяния Φ_b от токов в лобовых частях обмоток статора и ротора ЭД замыкается через подшипниковый щит, МЖГ с МЖ и вал. При изменении нагрузки ЭД и тока $I_{эд}$ изменяется Φ_b , что влияет на свойства МЖ и характеристики МЖГ. Вращающийся с синхронной частотой Φ_b воздействует на МЖ и увлекает ее. Необходимая энергия на вращение МЖ в зазоре будет поступать не только со стороны вращающегося вала (механическая часть энергии), но и со стороны вращающегося Φ_b (электромагнитная часть энергии) (рис. 3), что снижает момент трения $M_{тр}$ на валу. Профиль изменения частот вращения слоев МЖ в зазоре при разных Φ_b для вязкости МЖ $\eta_{МЖ} = \text{const}$ представлены на рисунке 4.

Вязкость МЖ η нелинейно зависит от магнитной индукции B , скорости сдвига слоев МЖ γ и $T_{МЖ}$ (рис. 5-7).

Изменение B , вследствие изменения магнитных потоков, изменяет η_B и напряжение сдвига τ_v (рис. 5). При изменении n ЭД пропорционально изменяется γ . МЖ, вследствие структурирования магнитных частиц при малых γ , обладает нелинейной зависимостью $\eta_\gamma = f(\gamma)$ (рис. 6). С ростом $T_{МЖ}$ η_t нелинейно и существенно снижается (рис. 7).

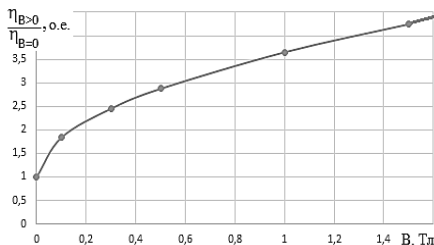


Рис. 5. Зависимость относительной вязкости МЖ от B при $T_{МЖ} = 20$ °С, $\gamma = 1000$ с⁻¹

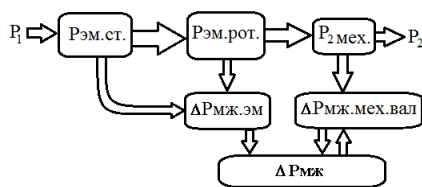


Рис. 3. Энергетическая диаграмма при работе МЖГ в АД

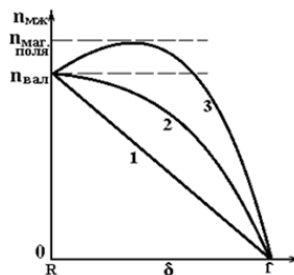


Рис. 4. Профиль изменения частот вращения слоев МЖ в зазоре при $\eta_{МЖ} = \text{const}$:
1 - $\Phi_b=0$; 2 - $\Phi_b>0$; 3 - $\Phi_b>>0$

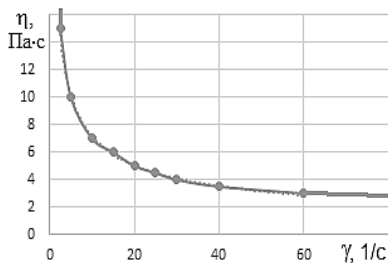


Рис. 6. Реологическая характеристика МЖ при $B = 0$ Тл, $T_{МЖ} = 20$ °С

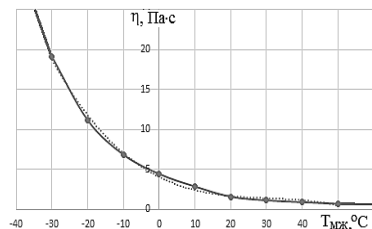


Рис. 7. Температурная зависимость вязкости МЖ при $B = 0$ Тл, $\gamma = 1000$ с⁻¹

Сформированы математические зависимости $\eta = f(\gamma, B, T)$:

- зависимости $\eta_B = f(B)$ и $\tau_B = f(B)$ при $T_{МЖ} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\gamma = 1000 \text{ c}^{-1}$ можно описать как

$$\eta_{B>0} = \eta_{B=0}(1 + 2,65\sqrt{B}); \quad \tau_{B>0} = \tau_{B=0}(1 + 2,65\sqrt{B}); \quad (2)$$

- зависимость $\eta_\gamma = f(\gamma)$ по отношению к $\eta_{\gamma=1000}$ (при $\gamma = 1000 \text{ c}^{-1}$, для которой η_γ перестает изменяться) при $B = 0 \text{ Тл}$ и $T_{МЖ} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ описано соотношением

$$\eta_\gamma = 31,62\eta_{\gamma=1000}\sqrt{\gamma}; \quad (3)$$

- зависимость $\eta_T = f(T_{МЖ})$ по отношению к $\eta_{T=20}$ (при $T_{МЖ} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) для $B = 0 \text{ Тл}$ и $\gamma = 1000 \text{ c}^{-1}$ можно аппроксимировать соотношением

$$\eta_T = 3\eta_{20}e^{-T_{МЖ}}. \quad (4)$$

Обоснованы условия регулирования в системе для компенсации $\Delta p_{\text{внеш}}$ и удержания МЖ в зазоре при n на основе разработанных математических моделей изменения токов в регулирующих обмотках и формирования управляющих воздействий, что позволяет реализовывать целенаправленное управление свойствами МЖГ при учете ограничений на $v_{\text{МЖ.крит}}$:

$$\text{по } \Delta p_{\text{внеш}} - v_{\text{МЖ.крит}} \leq \sqrt{D[M(B_{\text{max}} - B_{\text{min}}) - \Delta p_{\text{внеш}}/Z]/(\rho_{\text{МЖ}} \delta)}; \quad (5)$$

$$\text{по } T_{\text{МЖ.МАХ}} - v_{\text{МЖ.крит}} \leq \sqrt{8(T_{\text{max}} - T_{\text{внеш}})\lambda/\eta}; \quad (6)$$

$$I_p = \frac{1,59\delta 10^6}{MW_p} \left[k_{\text{зап}} \Delta p_{\text{внеш}}/Z + \rho_{\text{МЖ}} \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \delta/D \right]; \quad (7)$$

$$I_n = \frac{1,59\delta 10^6}{W_n} \left[\frac{8\lambda(T_{\text{МЖ.маx}} - T_{\text{МЖ}}) - \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \eta_{B=0}}{2,65} \right]^2; \quad (8)$$

где $k_{\text{зап}} = 1,5-3$ - коэффициент запаса, Z - число зубцов полюсных наконечников МЖГ, λ - теплопроводность МЖ.

Алгоритм в виде блок-схемы программы управления токами в обмотках МЖГ в зависимости от сигналов Δp , D_p при контроле $T_{\text{МЖ}}$ представлен на рисунке 8.

Показано, что для формализации нелинейных системных связей элементов и многофакторных зависимостей в системе магнитожидкостной герметизации эффективно применение усовершенствованных планов факторного эксперимента при минимальном числе вычислительных экспериментов и/или опытных данных. Математические модели системных связей в виде сформированных полиномов могут реализовываться в качестве задающих функций регуляторов в системе.

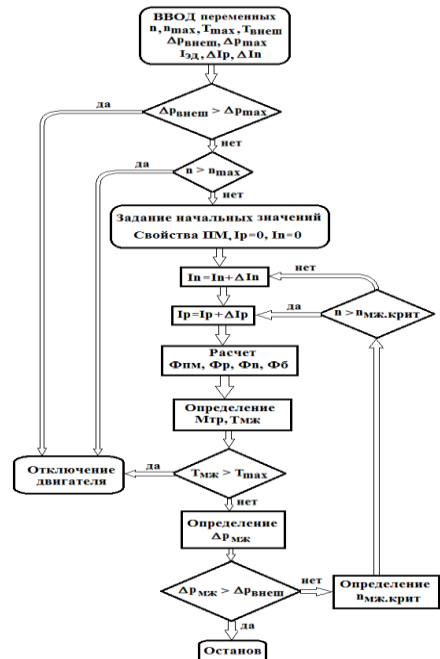


Рис. 8. Алгоритм управления в МЖГ

Из анализа распределений магнитных полей выявлено, что при чугунном щите проникающий в МЖГ Φ_b в 1,8 раза больше, чем при немагнитном (алюминиевом) щите. При стальном щите Φ_b возрастет еще на 2,36 %. Наибольший Φ_b проникает в МЖГ в режиме XX АД. С ростом нагрузки ($I_{эд}$) Φ_b снижается и в режиме пуска может даже изменить знак. Сформирована математическая зависимость $\Phi_b = f(I_{эд})$.

В зазоре МЖГ Φ_b накладыва-ется на поток магнита $\Phi_{пм}$, усиливает индукцию под одной полюсной приставкой и ослабляет ее под другой в режиме XX до 14 % (рис. 11), что снижает $\Delta p_{v.кр.мжг}$ и $v_{мж.крит}$ до 4,5 %. Так как Φ_b вращается с синхронной частотой, а $\Phi_{пм}$ неподвижен, то периодически в заданном сечении по окружности зазора под одной полюсной приставкой магнитная индукция будет то усиливаться, то ослабляться. Под другой полюсной приставкой наоборот.

Для исследования влияния регулирующей обмотки на свойства МЖГ проведено моделирование созданной физической модели управляемого МЖГ с комбинированным магнитоэлектрическим возбуждением (рис. 12). На основе расчетных исследований (рис. 13,14) установлено, что изменением величины и направления тока регулирующей обмотки I можно изменять $B_{ср}$ в зазоре МЖГ с 0,06 до 0,49 Тл, т.е. в 8,17 раза, что изменяет магнитную силу, удерживающую МЖ в зазоре, $\Delta p_{v.кр.мжг}$, $M_{тр}$ и $T_{мж}$.

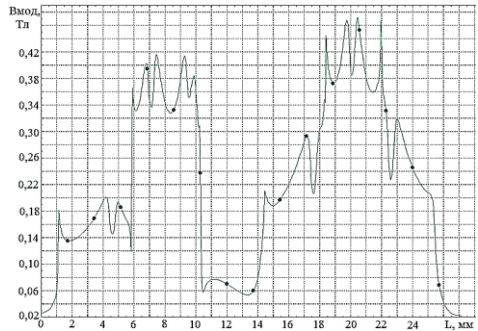
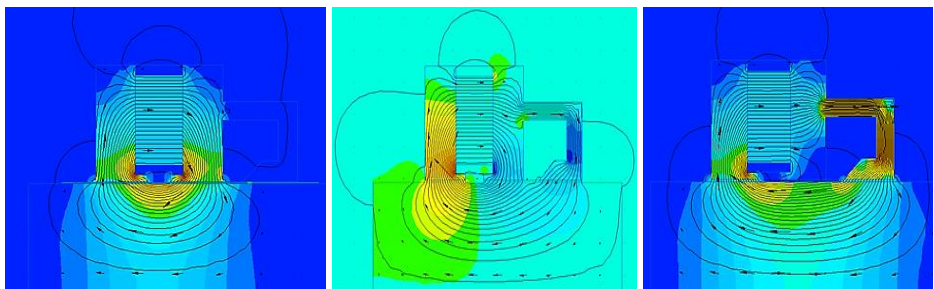


Рис. 11. Распределение модуля индукции в зазоре МЖГ с учетом Φ_b в режиме XX АД



Рис. 12. Модель управляемого МЖГ



а) б) в)

Рис. 13. Линий магнитного потока в МЖГ с ПИМ при НС регулирующей обмотки:
а – $I_W=200$ А; б – $I_W=0$ А; в – $I_W=-200$ А

Увеличение

$\Delta p_{\text{внеш}}$ выдавливает МЖ из зазора, при предельном давлении МЖ занимает критическое положение. Неучет положения и формы МЖ приводит к погрешностям определения свойств МЖГ. На основе полевого моделирования определены критическое положение МЖ и ее форма (рис. 15).

При вращении вала в псевдопластичной МЖ возникает тангенциальное течение, определяющее $M_{\text{тр}}$ и $\Delta P_{\text{мж}}$. Для ламинарного течения с концентрическими вокруг вала слоями (струями) течения для критического положения МЖ в системе MatLab в плоскомеридианном сечении рассчитано поле скоростей течения МЖ (рис. 15). На поверхности вала $v_{\text{мж}} = v_{\text{вал}}$, на поверхности зубца $v_{\text{мж}} = 0$.

Выполнен анализ изменения $\Delta p_{v, \text{кр. мжг}} = f(n)$ с учетом структурной составляющей перепада давлений и разрушения структуры магнитных частиц при $v_{\text{разр}}$, перераспределения концентрации магнитных частиц в неоднородном магнитном поле МЖГ с использованием уточняющего параметра $K_p = f(B_{\text{max}})$

$$\Delta p_{v, \text{кр. мжг}} = Z \{ K_p \Delta p_{\text{ст. кр. мжг}} (1 + 0.25 e^{-3v_{\text{мж}}/v_{\text{разр}}}) - \rho_{\text{мж}} v_{\text{мж}}^2 \delta / D \}. \quad (9)$$

Определено, что для МЖГ АД ВРАБ225 $\Delta p_{v, \text{кр. мжг}}$ становится равным нулю при $n_{\text{крит}} = 14110$ об/мин (рис. 16), что соответствует $v_{\text{крит}} = 47,95$ м/с.

Анализ изменения $M_{\text{тр}}$ при изменении n

$$M_{\text{тр}} = 4\pi^2 Z \eta n R^3 b / (60\delta) + 2\pi\beta R^2 Z b \tau_{0, B>0} e^{-3v_{\text{мж}}/v_{\text{разр}}} \quad (10)$$

подтвердил, что для псевдопластичной МЖ в зоне малых n наблюдается минимум $M_{\text{тр}}$, наступающий при разрушении структуры магнитных частиц (рис. 17).

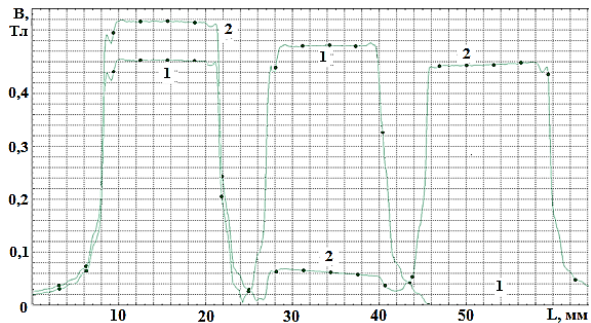


Рис. 14. Модуль магнитной индукции в зазоре МЖГ с ПМ при НС регулирующей обмотки: 1 – $I_W = 200$ А; 2 – $I_W = -200$ А

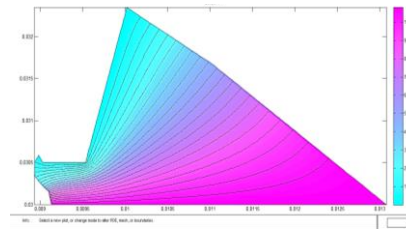


Рис. 15. Критическое положение МЖ и линии равных скоростей течения

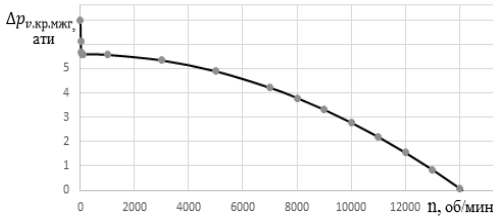


Рис. 16. Изменение $\Delta p_{v, \text{кр. мжг}}$ МЖГ с изменением n для АД ВРАБ225

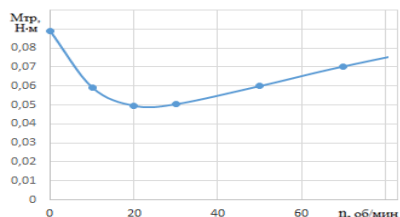


Рис. 17. Изменение $M_{\text{тр}}$ МЖГ при небольших n для АД ВРАБ225

На основе моделирования магнитных полей и распределения поля скоростей течения МЖ с учетом взаимозависимости свойств МЖ выявлено, что разброс γ по зонам МЖ может достигать 5 раз - от γ_{\max} в минимальном зазоре под зубцом до γ_{\min} в межзубцовом пространстве, изменение V_{\max}/V_{\min} – до 3-5 раз, концентраций магнитных частиц - до 2 раз, вязкости МЖ - до 3 раз.

Диссипация энергии вязкого трения слоев МЖ объемом $V_{\text{МЖ}}$ при вращении

$$\Delta P_{\text{МЖ}} = 0,5\eta\gamma^2 V_{\text{МЖ}} \quad (11)$$

вызывает ее разогрев. Из-за невысокой теплопроводности $\lambda_{\text{МЖ}} \sim 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ в МЖ могут возникать зоны с предельной температурой $T_{\text{МЖ.мах}}$. Анализ теплового состояния МЖГ проводился на 3D моделях в комплексе Ansys (рис. 18а) и на 2D моделях в комплексе Elcut (рис. 18б,в) с термозависимыми удельными тепловыделениями при выявленных для 5 зон зависимостях $\eta_{\text{МЖ}} = f(V_{\text{ср}}, \gamma, T_{\text{МЖ}})$ для критического положения МЖ.

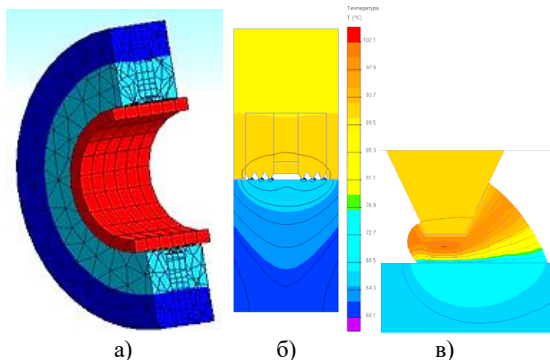


Рис. 18. Распределение температур (а), изотермы в МЖГ (б) и в области МЖ (в) при $n = 11703 \text{ об}/\text{мин}$

Определено, что при $n = 11703 \text{ об}/\text{мин}$ $T_{\text{МЖ.мах}}$ достигает $102 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Различие температур по зонам МЖ может составлять $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Неучет нелинейных зависимостей $\eta_{\text{МЖ}} = f(V_{\text{ср}}, \gamma, T_{\text{МЖ}})$ приводит к завышению расчетных перегревов МЖ. Нагрев МЖ снижает $\Delta p_{\text{в.кр.МЖГ}}$ с интенсивностью до $-0,35 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{C}$.

Исследовано влияния шероховатости поверхностей вала и полюсов, контактирующих с МЖ, на работу МЖГ. Установлено, что неоднородность магнитного поля проявляется в зазоре до двойной величины микронеровности поверхности, увеличение шероховатости поверхности до $9,477 \text{ мкм}$ приводит к повышению площади контакта поверхности с МЖ до $6,8 \text{ } \%$, что повышает $M_{\text{тр}}$ и нагрев МЖГ.

Методами планирования эксперимента на основе применения рототабельного центрально-ортогонального насыщенного плана второго порядка с единичной областью планирования в виде правильного пятиугольника сформированы нелинейные зависимости влияния η , n , времени работы t на $M_{\text{тр}}$ и $T_{\text{МЖ}}$ для разных шероховатостей поверхности Ra . Для $Ra = 8,028 \text{ мкм}$ полученные соотношения (12-14) могут быть представлены в графическом виде (рис. 19):

$$\dot{M}_{\text{тр}} = 0,00261 + 0,01\eta + 4,9 \cdot 10^{-6}n + 1,84 \cdot 10^{-5}\eta n - 0,0077\eta^2 - 3,17 \cdot 10^{-11}n^2; \quad (12)$$

$$\dot{T}_{\text{МЖ}} = 25,0 + 2,264\eta + 0,01334n + 0,0064\eta n - 3,222\eta^2 - 1,607 \cdot 10^{-6}n^2; \quad (13)$$

$$\dot{T}_{\text{МЖ}} = 22,12 + 0,55626t + 0,0089n + 0,00071tn - 0,03236t^2 - 1,7 \cdot 10^{-6}n^2. \quad (14)$$

Установлено, что $M_{\text{тр}}$ возрастает с увеличением η и n ; η оказывает влияние на $M_{\text{тр}}$ в 2,9 раза сильнее, чем n ; повышение Ra увеличивает $M_{\text{тр}}$, влияние n на $M_{\text{тр}}$ усиливается; повышение η и n увеличивают $T_{\text{МЖ}}$, n влияет на $T_{\text{МЖ}}$ в 3,1 раза сильнее, чем η ; при меньшей Ra влияние n на $T_{\text{МЖ}}$ в 6,76 раза больше влияния η ; при увеличении t повышается $T_{\text{МЖ}}$, влияние t на $T_{\text{МЖ}}$ в 1,33 раза меньше влияния n .

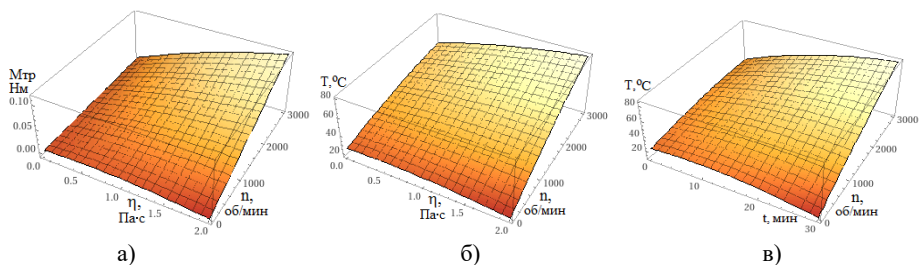


Рис. 19. Графическое представление зависимостей $M_{тр} = f(\eta, n)$ (а), $T_{мж} = f(\eta, n)$ (б) и $T_{мж} = f(t, n)$ (в) при $Ra = 8,028$ мкм

В пятой главе представлена практическая реализация и экспериментальные исследования системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей. Разработаны патентозащищённые, экспериментально обоснованные технологические способы совершенствования МЖГ, обеспечивающие снижение $M_{тр}$, повышение износостойкости и срока службы, надежности МЖГ.

Разработана физическая модель управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых ЭД (рис. 20а), которая позволяет проводить экспериментальные исследования влияния конструктивных (δ , Ra , выбранных магнитов и МЖ) и режимных (n , $\Delta p_{внеш}$, $T_{внеш}$) параметров на показатели МЖГ - $M_{тр}$ и $T_{мж}$ при автоматизации испытаний (рис. 20б).

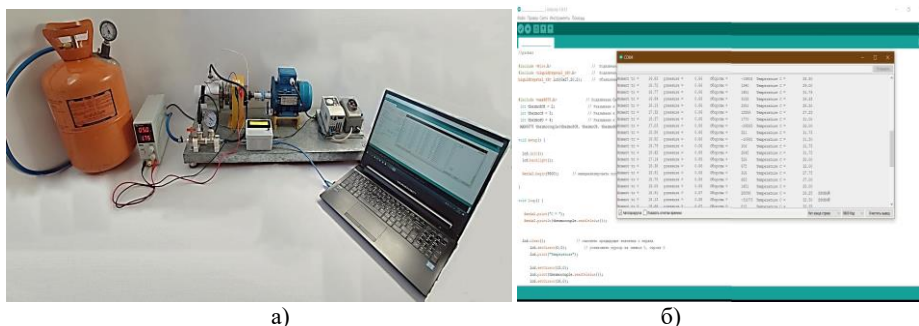


Рис. 20. Автоматизированная установка (а) и протокол (б) экспериментального исследования управляемой системы магнитожидкостной герметизации валов ЭД

Экспериментально установлено, что за $t = 30$ минут $T_{мж}$ может повыситься на 50 °С. При повышении n с 556 до 2897 об/мин, т.е. в 5,21 раза, $T_{мж}$ повышается до 2 раз (с $33-38$ °С до $67-78$ °С), $M_{тр}$ повышается в 1,85-2,2 раза. При повышении $T_{мж}$ на 50 °С $M_{тр}$ снижается до 3 раз. Увеличение Ra с 0,357 до 7,21 мкм повышает $T_{мж}$ до 20 %, $M_{тр}$ до 55 %. Методами планирования эксперимента сформированы линейные математические модели влияния η , n и Ra на $M_{тр}$ и $T_{мж}$. Установлено, что η оказывает влияние на $M_{тр}$ в 1,32 раза сильнее, чем n , и в 2,32 сильнее, чем Ra . Расхождение расчетных данных с опытными результатами в плановых точках не превышают 7 %.

Экспериментально подтверждена возможность регулирования $\Delta p_{v.кр.мжг}$ в диапазоне до $(-20 \div +20)$ % для разных n путем управления I_p (рис. 21). На основе экспериментальных результатов сформирована функциональная зависимость $\Delta p_{v.кр.мжг} = f(I_p, n)$ для задания управляющего воздействия в регулятор тока обмотки МЖГ

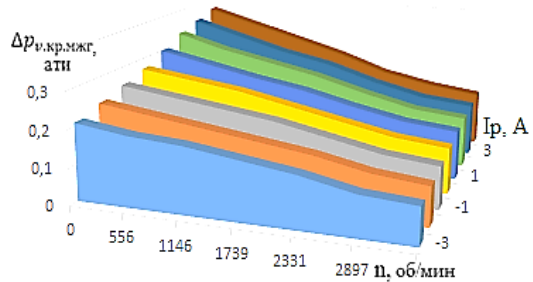


Рис. 21. Изменение $\Delta p_{кр.мжг}$ при изменении I_p и n

$$\Delta \hat{p}_{кр} = 0,2708 + 0,0286441I_p - 1,8 \cdot 10^{-5}n - 6,4 \cdot 10^{-6}I_p n - 0,00156I_p^2 - 8,3 \cdot 10^{-9}n^2.$$

Для взрывозащищенного АД BRAБ225 разработан усовершенствованный МЖГ, испытания подтвердили повышенную эффективность герметизации вала.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложении приведены копии патентов на изобретения и свидетельства о регистрации программы, актов внедрений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение эффективности герметизации и безопасной эксплуатации электродвигателей, работающих в особых условиях, с изменяемым режимом работы, при разнообразных внешних воздействиях возможно путем применения магнитоэлектрических герметизаторов (МЖГ) валов, обеспечивающих снижение техногенного риска уплотнительной системы в 4-7 раз.

2. Разработана управляемая электротехническая система магнитоэлектрической герметизации валов регулируемых электродвигателей с изменением свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий, условий и режимов работы с обоснованием структуры элементов, схемы функционирования, системных связей элементов. Предложены конструкции управляемых МЖГ, обеспечивающих повышенную эффективность герметизации вращающихся валов.

3. Выбранный способ и средства управления, условия регулирования, разработанная модель и схема управления обеспечивают требуемое изменение свойств электротехнической системы при изменении режима и условий работы регулируемых электродвигателей. Разработанные имитационные модели электротехнической системы позволяют моделировать работу системы при изменении частоты вращения, воздействующего перепада давлений, внешней температуры. Предложенные алгоритм и программа управления электротехнической системой позволяют автоматизировать управление свойствами системы.

4. Установлено, что изменением величины и направления тока регулирующей обмотки, для модели МЖГ с комбинированным магнитоэлектрическим возбуждением, можно регулировать индукцию в зазоре в 8,17 раза, что изменяет критический удерживаемый перепад давлений, момент трения и нагрев МЖГ.

5. Показано, что анализ свойств системы при существенном различии в зонах МЖ скоростей сдвига слоев, индукций, концентраций магнитных частиц,

намагниченностей и вязкостей должен включать уточненный расчет структурных составляющих перепада давлений и момента трения, нахождение критического положения и формы МЖ, определение распределения поля скоростей течения МЖ, расчет мощности потерь, моментов трения и нагревов, учет шероховатости поверхностей, контактирующих с МЖ, на множестве зон.

6. Выполнено уточненное моделирование компонентов и расчетное исследование свойств системы. Электромагнитные процессы в электродвигателе посредством воздействия вращающегося магнитного потока торцевого рассеяния лобовых частей обмоток Фб оказывают влияние на магнитное поле и работу МЖГ. При чугунном подшипниковом щите Фб, проникающий в МЖГ, в 1,8 раза больше, чем при алюминиевом щите. При стальном щите, применяемом для повышения прочности корпуса в взрывозащищенных электродвигателях, Фб возрастет еще на 2,36 %. Фб усиливает индукцию в зазоре МЖГ с постоянным магнитом под одной полюсной приставкой и ослабляет ее под другой до 14 %, что снижает критический удерживаемый перепад давлений МЖГ до 4,5 %.

7. Установлено, что вязкость МЖ η оказывает влияние на момент трения $M_{тр}$ в 2,9 раз сильнее, чем частота вращения n и в 2,32 сильнее, чем возрастание шероховатости поверхности Ra ; повышение n увеличивает температуру МЖ $T_{мж}$ в 3,1 раза сильнее, чем η и в 1,33 раза сильнее времени работы t . За время работы 30 минут $T_{мж}$ может повыситься до 50 °С. При повышении n в 5,21 раза $T_{мж}$ повышается до 2 раз, $M_{тр}$ повышается до 2,2 раз. При повышении $T_{мж}$ на 50 °С $M_{тр}$ снижается до 3 раз. Увеличение Ra с 0,357 до 7,21 мкм повышает $T_{мж}$ на 20 %, $M_{тр}$ до 55 %. Различие температур по зонам МЖ может достигать 60 °С. С ростом $T_{мж}$ удерживаемый перепад давлений $\Delta p_{v,кр.мжг}$ снижается с интенсивностью до -0,35 %/°С. При изменении тока регулирующей обмотки I_p от -3 до +4 А диапазон регулирования $\Delta p_{v,кр.мжг}$ для разных n может достигать (-20 ÷ +20) %.

8. Методами планирования вычислительного и физического эксперимента проанализированы нелинейные взаимные связи в системе. Сформированные математические модели системных связей системы в виде полиномов могут реализовываться в качестве задающих функций регуляторов в системе.

9. Предложены способы совершенствования МЖГ валов электродвигателей, обеспечивающие снижение момента трения, повышение износостойкости поверхности и межремонтного срока работы вала, ресурса и надежности МЖГ.

10. Разработана физическая модель управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей, позволяющая проводить экспериментальные исследования влияния конструктивных (зазора, шероховатости поверхностей, применяемых магнитов и МЖ) и режимных параметров (частоты вращения вала, воздействующего перепада давлений, внешней температуры) на момент трения и нагрев МЖ. Расхождения расчетных данных с опытными результатами не превышают 7 %.

11. Для взрывозащищенного электродвигателя ВРАБ225 АО “ЭЛДИН” разработан и изготовлен усовершенствованный МЖГ вала с производимой в ИГЭУ МЖ. Испытания МЖГ продемонстрировали повышенную эффективность герметизации и сниженный момент трения в электродвигателе, работающего в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Таким образом, на основе разработки, анализа и применения электротехнической системы с управляемым магнитожидкостным герметизатором достигнуто повышение эффективности герметизации регулируемых электродвигателей путем изменения свойств уплотнительной системы при изменении внешних воздействий и режимов работы, т.е. цель диссертации достигнута.

Полученные в диссертации результаты целесообразны к дальнейшему использованию в организациях, занимающихся разработкой, производством и применением уплотнительных устройств специальных регулируемых электродвигателей на основе электротехнических систем с управляемыми магнитожидкостными герметизаторами. Полученные в диссертации результаты целесообразны к использованию в учебном процессе ВУЗов.

Направления дальнейших исследований могут быть ориентированы на расширение применимости управляемых электротехнических систем магнитожидкостной герметизации валов, повышение автоматизации управления системой, уточненное моделирование системы и ее компонентов.

Основные публикации, в которых отражены результаты диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Власов, А.М.** Влияние конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов валов электродвигателей / **А.М. Власов, Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев** // Вестник ИГЭУ. - 2019. № 5. С. 40-47.

2. Полетаев, В.А. Установка для исследования эксплуатационных характеристик магнитожидкостных герметизаторов / В.А. Полетаев, **А.М. Власов**, Т.А. Пахолкова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2017. Т. 21. № 2 (76). С. 17-23.

3. Полетаев, В.А. Моделирование поверхностей трения рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора / В.А. Полетаев, **А.М. Власов** // Трение и смазка в машинах и механизмах - 2015. № 5. С. 27-30.

4. Полетаев, В.А. Исследование влияния качества поверхности магнитных полюсов на момент трения магнитожидкостных герметизаторов // В.А. Полетаев, С.М. Перминов, Т.А. Пахолкова, **А.М. Власов** // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2014. №9. С. 38-43.

5. Полетаев, В.А. Установка для исследования влияния рабочего зазора на момент трения магнитожидкостных устройств / В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова, **А.М. Власов** // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2013. № 9. С. 27-31.

В издании, индексируемом в базе данных SCOPUS

6. **Vlasov, A.** Research of Magnetic-Liquid Shaft Sealers of Electric Motors / **A. Vlasov, V. Poletaev** // В сб.: Proceedings - 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 22-24 Sept. 2020, Chelyabinsk, Russia - Publisher: IEEE Xplore: 07 October 2020, pp. 63-69. 20034028.

В виде результатов интеллектуальной деятельности

7. Патент на изобретение RU №2721400 С1. Магнитожидкостное уплотнение вала электродвигателя / **Власов А.А., Казаков Ю.Б., Полетаев В.А.** / Заявка №2019133087 от 16.10.2019. Оpubл. в Б.И. №14 от 19.05.2020.

8. Патент на изобретение RU № 2721967 С1. Способ повышения ресурса и надежности магнитожидкостных герметизаторов / Полетаев В.А., Казаков Ю.Б., Ведерникова И.И., **Власов А.М.** / Заявка № 2019114386, 07.05.2019. Оpubл. 25.05.2020 Бюл. № 15.

9. Патент на изобретение RU № 2725399 С1. Магнитожидкостное уплотнение вала с пониженным моментом трения / Полетаев В.А., Казаков Ю.Б., Ведерникова И.И., **Власов А.М.** / Заявка № 2019133086, 22.11.2019. Опубл. 02.07.2020. Бюл. № 19.

10. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2020667630 «Программа управления магнитожидкостной герметизацией валов частотно-регулируемых электродвигателей с изменяемым удерживаемым перепадом давления» / **Власов А.М.**, Казаков Ю.Б., Нестеров С.А. // ФГБОУ ВО ИГЭУ – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.12.2020 г. Бюл. № 1.

Публикации в других изданиях

11. Казаков, Ю.Б. Частотно-регулируемые электродвигатели с магнитожидкостной герметизацией выходного вала / Ю.Б. Казаков, **А.М. Власов** // Труды XVIII Междун. конф. «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты (МКЭЭЭ-2020)». – Изд-во: Знак, 2020. - С. 95-100.

12. **Власов, А.М.** Система регулируемой магнитожидкостной герметизации валов электродвигателей / **А.М. Власов**, Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев // 19 Межд. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Иваново, ИГЭУ. 2020. - С. 244-249.

13. **Власов, А.М.** Электротехническая система магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей с изменяемым удерживаемым перепадом давления / **А.М. Власов**, Ю.Б. Казаков // Межд. (XX Всерос.) науч.-техн. конф.: «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». - Иваново, ИГЭУ. 2019. - С. 197-200.

14. **Власов, А.М.** Электротехническая система регулируемого магнитожидкостного уплотнения валов электродвигателей / А.М. Власов, С.А. Нестеров, Ю.Б. Казаков // IV Всерос. конф.: Молодежная наука: вызовы и перспективы – Самара: СамГТУ, 2021. С.379-382.

15. Полетаев, В.А. Повышение эффективности работы системы магнитожидкостной герметизации валов электродвигателя / В.А. Полетаев, И.И. Ведерникова, Ю.Б. Казаков, **А.М. Власов** // 19 Межд. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Иваново, ИГЭУ. 2020. - С. 250-255.

16. Полетаев, В.А. Повышение ресурса и надежности магнитожидкостных герметизаторов / В.А. Полетаев, И.И. Ведерникова, Ю.Б. Казаков, **А.М. Власов** // 19 Межд. Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. - Иваново, ИГЭУ. 2020. - С. 256-261.

17. Poletaev, V.A. Study of the influence of the magnetic field and the value of the working gap at the moment of friction of magnetic liquid devices / V.A. Poletaev, **А.М. Vlasov**, Т.А. Pakholkova // Journal of Advanced Research in Technical Science. - 2019. № 13. - Pp. 5-12.

18. Полетаев, В.А. Исследование магнитного поля в рабочем зазоре магнитожидкостного герметизатора / В.А. Полетаев, **А.М. Власов**, Т.А. Пахолкова // Международный научно-исследовательский журнал. - 2019. № 2 (80). - С. 53-58.

19. Полетаев, В.А. Исследование влияния формы концентратора магнитного поля на рабочие характеристики магнитожидкостного герметизатора / В.А. Полетаев, **А.М. Власов** // Вестник Брянского государственного технического университета -2018, №3(64). С.23-28.

20. **Власов, А.М.** Исследование магнитожидкостного герметизатора с помощью полного факторного эксперимента / **А.М. Власов**, В.А. Полетаев // IX Всерос. конф.: «Надежность и долговечность машин и механизмов». – Иваново, 2018. - С. 46-48.

21. **Власов, А.М.** Исследование изменения температуры в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов с применением программы ANSYS / **А.М. Власов**, В.А. Полетаев // Инженерный журнал: наука и инновации. - 2015. № 8 (44). С. 5-7.

22. **Власов, А.М.** Применение программы ANSYS при исследовании трибологических характеристик магнитожидкостных герметизаторов / **А.М. Власов**, В.А. Полетаев // Физика, химия и механика трибосистем. – 2015, № 12. - С. 92-96.

23. **Власов, А.М.** Расчет моментов трения в магнитожидкостных устройствах при гидродинамической (жидкостной) смазке / **А.М. Власов, В.А. Полетаев** // Межд. научн.-техн. конф.: «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново, ИГЭУ. 2015. - С. 288-290.

24. Poletaev, V.A. Installazione di ricerca coppia di attrito dei dispositivi fluido magnetico / V.A.Poletaev, T.A.Pakholkova, **A.M. Vlasov**// Italian Science Review–2014, №4(13), p.456-460.

25. Полетаев, В.А. Моделирование магнитной системы установки для исследования влияния качества поверхностей рабочего зазора на момент трения / В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова, **А.М. Власов** // Международный научный институт "Educatio". – Новосибирск, 2014, № 4-2. - С. 76-79.

Личный вклад автора на всех этапах исследования являлся определяющим: в [11-14] автору принадлежит постановка задач исследования, разработка управляемой электротехнической системы магнитожидкостной герметизации валов регулируемых электродвигателей; в [7-9, 15, 16] – выбор способа, схемы и средств управления, разработка управляемых герметизаторов; в [3, 20, 23, 25] - разработка уточненных математических компьютерных и имитационных моделей компонентов системы, методик расчетных исследований; в [1, 4, 6, 17-19, 21, 22, 24] – непосредственное проведение и анализ результатов расчётных исследований; в [10] - разработка алгоритма и программы управления системой; в [2, 5] – разработка и создание физической модели, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов; апробация и опубликование результатов, практическая реализация исследований.

ВЛАСОВ Алексей Михайлович
**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ
ГЕРМЕТИЗАЦИИ ВАЛОВ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
Подписано в печать _____ г. Формат 60x84¹/₁₆. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16
Тираж 100 экз. Заказ № _____

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ 153003, г. Иваново, ул. Рафаковская, 34