

На правах рукописи

2

Динь Конг Кюи

**РЕГУЛИРУЕМАЯ ГИСТЕРЕЗИСНАЯ МУФТА В СИСТЕМЕ
ПРИВОДА ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ**

Специальность 05.09.01 –

«Электромеханика и электрические аппараты»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2019 г.

Работа выполнена в Инженерной школе энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Гарганеев Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Симонов Борис Ферапонтович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, академик РАЕН, заведующий лабораторией силовых электромагнитных импульсных систем института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск.

Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, директор института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск.

Защита состоится «_6_» декабря 2019 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.10 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.10, к.т.н., доцент



С.Н. Кладиев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В многочисленных электроприводных системах электрический двигатель соединяется с производственным механизмом через муфту, служащую для передачи механической энергии с ведущего вала на ведомый при ограничении крутящего момента.

Весьма распространенными системами являются электроприводы (ЭП) запорной арматуры (ЭПЗА) для перекачки нефти и газа, в которых требование ограничения крутящего момента является обязательным условием безопасного и надежного функционирования трубопроводного транспорта нефтепродуктов. ЭПЗА выполняет функции перекрытия сечения трубопровода с фиксированным ограничением момента приводного двигателя (ПД) в условиях широкого температурного диапазона и удаления от диспетчерских пунктов и центральных электросетей.

Одним из вариантов построения ЭПЗА на основе гистерезисного принципа преобразования энергии является ЭП на базе широко применяемого асинхронного двигателя (АД) и управляемой электромагнитной гистерезисной муфты (ЭМГМ) с простым блоком для регулирования постоянного тока управления. В этом случае ЭМГМ располагается между АД и редуктором, предотвращая увеличение момента уплотнения клина задвижки сверх максимально допустимых значений. Если требуется изменить моменты уплотнения (вытяжки) применяется простейшая схема регулировки тока обмотки управления ЭМГМ на выходе или в составе выпрямителя.

Гистерезисные муфты в режиме несинхронного вращения, торможения или пуска работают с постоянством момента, что может явиться решающим фактором для безотказной работы технологического механизма – запорной арматуры. При этом возможно устранение сложного блока электронного управления на основе преобразователей частоты (ПЧ) или тиристорных регуляторов (ТР) с ограничением вращающего момента на основе его идентификации, значительно снижающих надежность ЭПЗА.

Значительный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований электромеханических преобразователей гистерезисного типа внесли отечественные ученые Ланген А. М., Мастяев Н.З., Орлов И.Н., Делекторский Б.А., Никаноров В.Б., Тарасов В.Н., Гарганеев А.Г. В области применения гистерезисных материалов в электромеханических муфтах следует отметить работы Ганзбурга Л. Б., Мизюрина С. Р., Ермилова М.А., Яковлева В.А., Гордеева Н.В., С. Scott, R. Toukola и др.

При большой распространенности ЭПЗА, в частности, в нефтегазовой отрасли, поиск новых технических решений ЭПЗА, позволяющих повысить надежность их работы в сложных условиях эксплуатации, а также снизить материальные затраты при изготовлении и эксплуатации, является актуальной задачей.

Объектом исследования является регулируемая ЭМГМ, работающая в составе ЭПЗА.

Предметом исследования являются электромагнитные процессы преобразования энергии в регулируемых гистерезисных муфтах.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование регулируемой гистерезисной муфты для применения в электроприводах запорной арматуры нефтегазопроводов.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи.

1. Изучить особенности эксплуатации, задач и технических решений ЭПЗА для трубопроводов в нефтегазовой отрасли.
2. Проанализировать технические решения гистерезисных муфт (ГМ) с целью определения возможностей их применения в ЭПЗА для трубопроводов в нефтегазовой отрасли.
3. Разработать конструктивные варианты ГМ с электромагнитным управлением.
4. Разработать математическую, имитационную модели, а также алгоритм расчета ЭМГМ.
5. Провести оптимизацию зубцовой зоны ЭМГМ с неподвижной обмоткой управления.
6. Проанализировать возможности функционирования ЭМГМ на основе сплава Fe-Cr-Co в диапазоне возможных частот вращения.
7. Произвести оценку теплового состояния ЭМГМ при перемагничивании гистерезисного слоя в режиме уплотнения (вытяжки) клина запорной арматуры (ЗА).
8. Проанализировать регулировочные возможности разработанных вариантов ЭМГМ.
9. Оценить массогабаритные показатели разработанных вариантов ЭМГМ.

Методы исследований. В диссертационной работе были применены математическое и имитационное моделирование с использованием прикладных пакетов *Mathcad 14*, *SOLIDWORKS*, *ANSYS MAXWELL*, а также экспериментальные исследования. Для построения регулировочных характеристик применялся численный метод – метод последовательных приближений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены и проанализированы зависимости вращающего момента от геометрических параметров зубцовой зоны муфты.
2. Разработана имитационная модель ЭМГМ с неподвижной обмоткой управления, позволяющая анализировать электромагнитные процессы в ней.
3. Получены оптимальные значения геометрических размеров зубцовой зоны ЭМГМ, позволяющие достичь максимальный вращающий момент при фиксированных значениях габаритов и веса муфты.
4. На основе анализа глубины проникновения магнитного поля в толщу гистерезисного слоя проведена оценка практического рабочего диапазона скорости вращения ЭМГМ.

5. Впервые произведена оценка теплового состояния ЭМГМ на основе сплава Fe-Cr-Co 22X15KA в режиме ограничения вращающего момента приводного электродвигателя ЭПЗА.

Практическая ценность работы:

1. Разработана методика расчета ЭМГМ для ЭПЗА нефтегазопроводов.
2. Разработан алгоритм расчета ЭМГМ, работающих в диапазоне моментов, характерных для ЭПЗА нефтегазопроводов.
3. Получены регулировочные характеристики ЭМГМ на основе сплава Fe-Cr-Co 22X15KA.
4. На основе анализа глубины проникновения магнитного поля в толщу гистерезисного слоя получено выражение, связывающее максимальный вращающий момент ЭМГМ на основе материала Fe-Co-Cr, со скоростью вращения приводного вала и числом зубцов индуктора.

На защиту выносятся:

1. Методика расчета ЭМГМ для ЭПЗА нефтегазопроводов.
2. Имитационная модель ЭМГМ с неподвижной обмоткой управления, позволяющая анализировать электромагнитные процессы в муфте.
3. Результаты оптимизации геометрических размеров зубцовой зоны с целью достижения максимального вращающего момента при фиксированных значениях габаритов и веса.
4. Результаты исследований процессов распространения магнитного поля в гистерезисном слое ЭМГМ в зависимости от частоты вращения ведущего вала относительно гистерезисного слоя, связанного с ведомым валом.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием научно-обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и расчетных данных. Результаты, полученные при проведении экспериментальных испытаний, подтверждают справедливость научных положений и применимость предложенных методов, технических решений и выводов.

Внедрение результатов исследований.

Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ООО НПО «Сибирский машиностроитель» для проектирования электроприводов запорной арматуры с использованием в качестве ограничителя момента запорного органа гистерезисной муфты, а также в учебном процессе инженерной школы энергетики НИ ТПУ при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 и магистров по направлению 13.04.02 (Электроэнергетика и электротехника) по профилям «Электрооборудование летательных аппаратов» и «Электротехнические комплексы автономных объектов».

Личный вклад автора. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в теоретических исследованиях, разработке, планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных данных, написании текстов статей и докладов. В работах,

написанных в соавторстве, автору принадлежат: математическая, имитационная модели и алгоритм расчета ЭМГМ, результаты оптимизации зубцовой зоны ЭМГМ, анализ электромагнитных процессов проникновения поля в толщу гистерезисного слоя ЭМГМ, оценка массогабаритных показателей ЭМГМ для различных конструкций.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались:

1. 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2018 – Proceedings, г. Новосибирск.
2. 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices June 29 - July 3, 2018 – Proceedings, г. Новосибирск.
3. 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices June 29 - July 3, 2019, – Proceedings, г. Новосибирск.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 7 публикациях, в том числе 3-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 4 статье, индексируемой в SCOPUS и WoS.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, определены объект и предмет исследования, сформирована цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ конструкций, основных особенностей эксплуатации и управления, а также требований к трубопроводной ЗА. Весьма распространенным типом ЗА являются задвижки, число которых только в РФ исчисляется сотнями тысяч. Проведен анализ режимов работы и эксплуатации ЭПЗА.

Вариантом, альтернативным ЭПЗА с электронной муфтой ограничения момента на основе ПЧ или ТР является ЭП на основе ПД переменного тока (как правило, АД) и ЭМГМ. В этом случае ЭМГМ располагается между АД и редуктором, предотвращая увеличение момента уплотнения клина задвижки сверх максимально допустимых значений. Сочетание особенностей гистерезисного преобразования энергии, простоты реализации и возможности регулирования момента в условиях высоких температур и окружных скоростей является предпосылкой альтернативного применения ГМ в ЭП, осуществляющих контроль ограничения момента в ЭПЗА.

Проведен обзорный анализ ГМ, разработанных отечественными и зарубежными авторами. Показано, что современным и перспективным материалом для ЭМГМ как и для гистерезисных двигателей является деформируемый сплав типа Fe-Cr-Co, обладающий высокими механическими и стабильными магнитными свойствами в широком температурном диапазоне и с большими для гистерезисных материалов значениями удельных потерь на гистерезис $p_r = 0,12 \div 0,18$ Дж/см³ и энергетического произведения $(BH)_{\max} = 40 \div 60$ кДж/м³.

Высокие прочностные свойства сплава Fe-Cr-Co способны конкурировать с высокопрочными сталями и титаном, что позволяет применять указанный сплав в безбандажных высокоскоростных механизмах.

На основании проведенного в главе анализа следует отметить, что традиционные решения и правила создания ЭПЗА, в частности, для трубопроводного транспорта нефти и газа могут иметь альтернативу в части применения регулируемых ЭМГМ, обладающих естественной природой ограничения передаваемого вращающего момента. Такие решения могут значительно упростить конструкцию ЭПЗА, повысить его надежность, а также снизить себестоимость как самого ЭП, так и его эксплуатации.

Во второй главе проведено математическое и имитационное моделирование ЭМГМ.

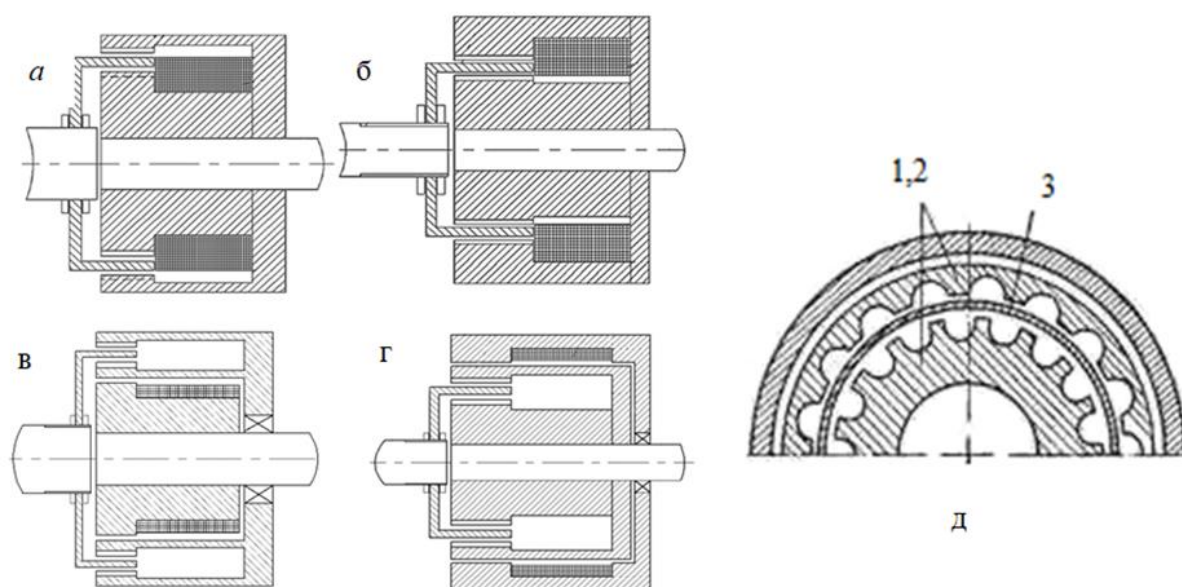


Рис.1. Конструкции ЭМГМ: а – с подвижной внутренней обмоткой; б – с подвижной наружной обмоткой; в – с неподвижной внутренней обмоткой; г – с неподвижной наружной обмоткой; д - поперечное сечение ГМ: 1, 2 – полумуфты; 3 – гистерезисный слой

ЭМГМ состоит из двух частей: ведомой (ротора) и ведущей (статора), механически не связанных друг с другом. Статор содержит магнитную систему, состоящую из внутреннего, наружного индукторов и обмотки возбуждения. Ротор состоит из гистерезисного слоя, закрепленного на ведомом валу. Были разработаны конструктивные варианты ГМ с электромагнитным управлением (рис. 1). На основе разработанных конструкций составлены методики их расчетов. Алгоритм расчета представлен на рис. 2. При расчете магнитной цепи ЭМГМ цепь разбивается на отдельные простейшие участки исходя из общей картины поля (рис. 3). При этом делается ряд упрощающих предположений: обмотка имеет равномерную намотку; намагничивание осуществляется по основной кривой намагничивания; поле в зазоре принимается плоским, без учета кривизны зазора; изменение торцового рассеяния зубцовых элементов муфты при сдвиге не происходит.

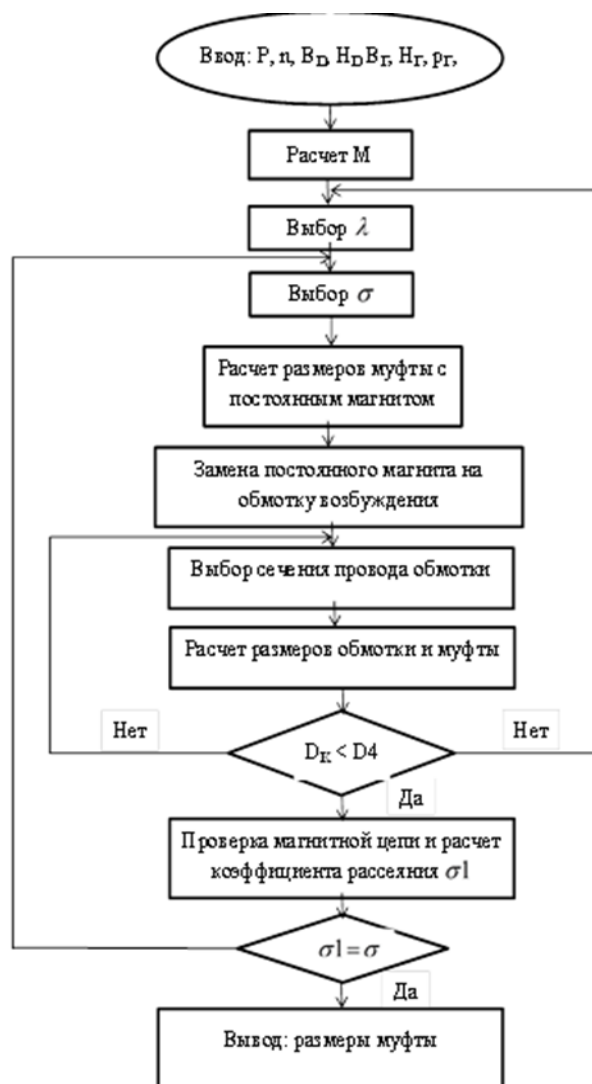


Рис. 2. Алгоритм расчета ЭМГМ

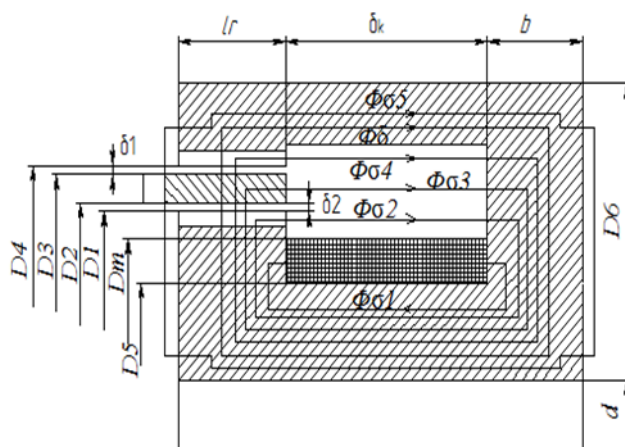


Рис. 3. Пример схемы магнитной цепи ЭМГМ с внутренней подвижной обмоткой возбуждения

Задача имитационного исследования в программе ANSYS MAXWELL состояла в поиске закономерностей изменения момента муфт на основе материала Fe-Cr-Co в зависимости от их конструктивных особенностей: типа, воздушного зазора и геометрии зубцовой зоны с целью выбора оптимального решения.

Полученные результаты моделирования ЭМГМ в программе ANSYS MAXWELL представлены на рис. 4-6.

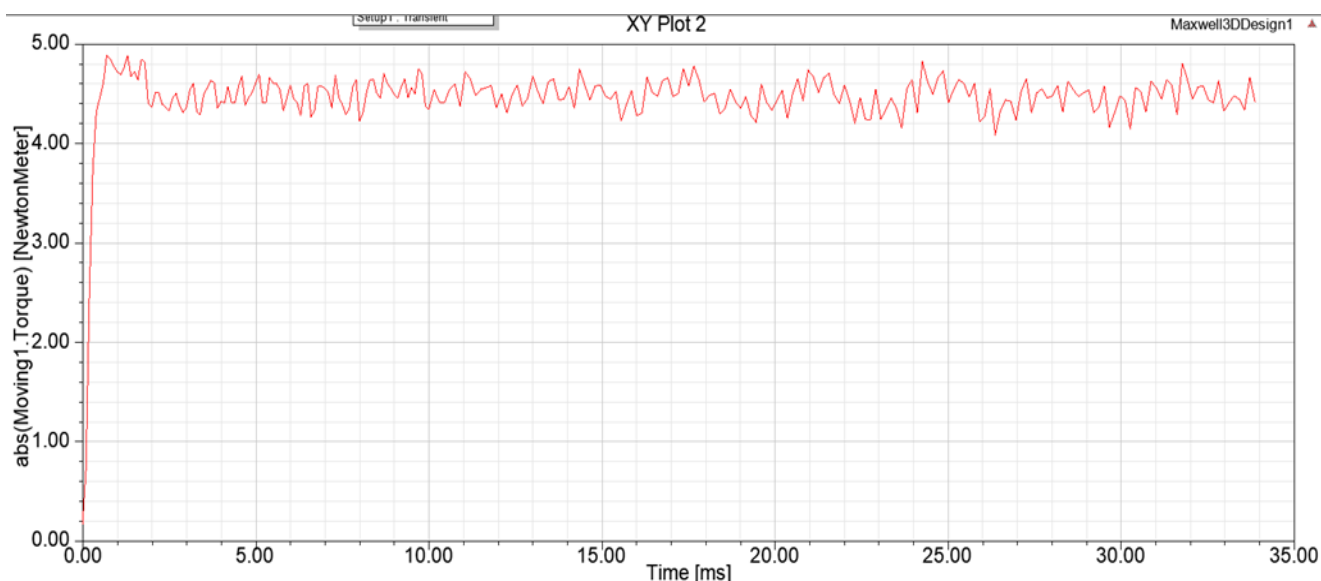


Рис. 4. Вращающий момент ЭМГМ в асинхронном режиме

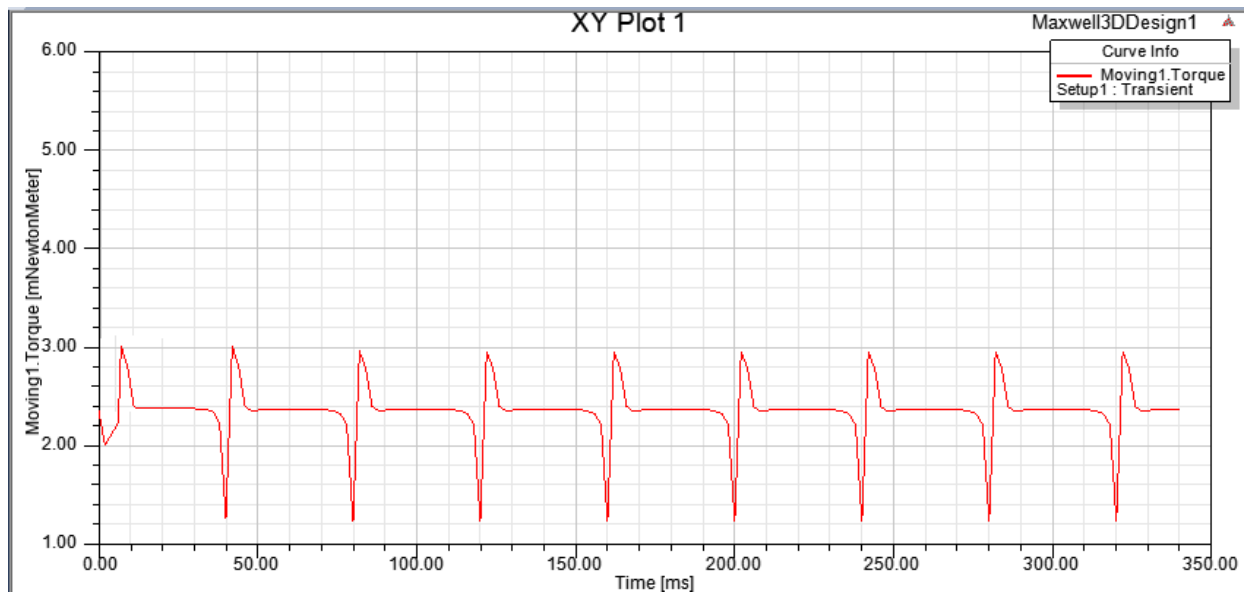


Рис. 5. Вращающий момент ЭМГМ в синхронном режиме

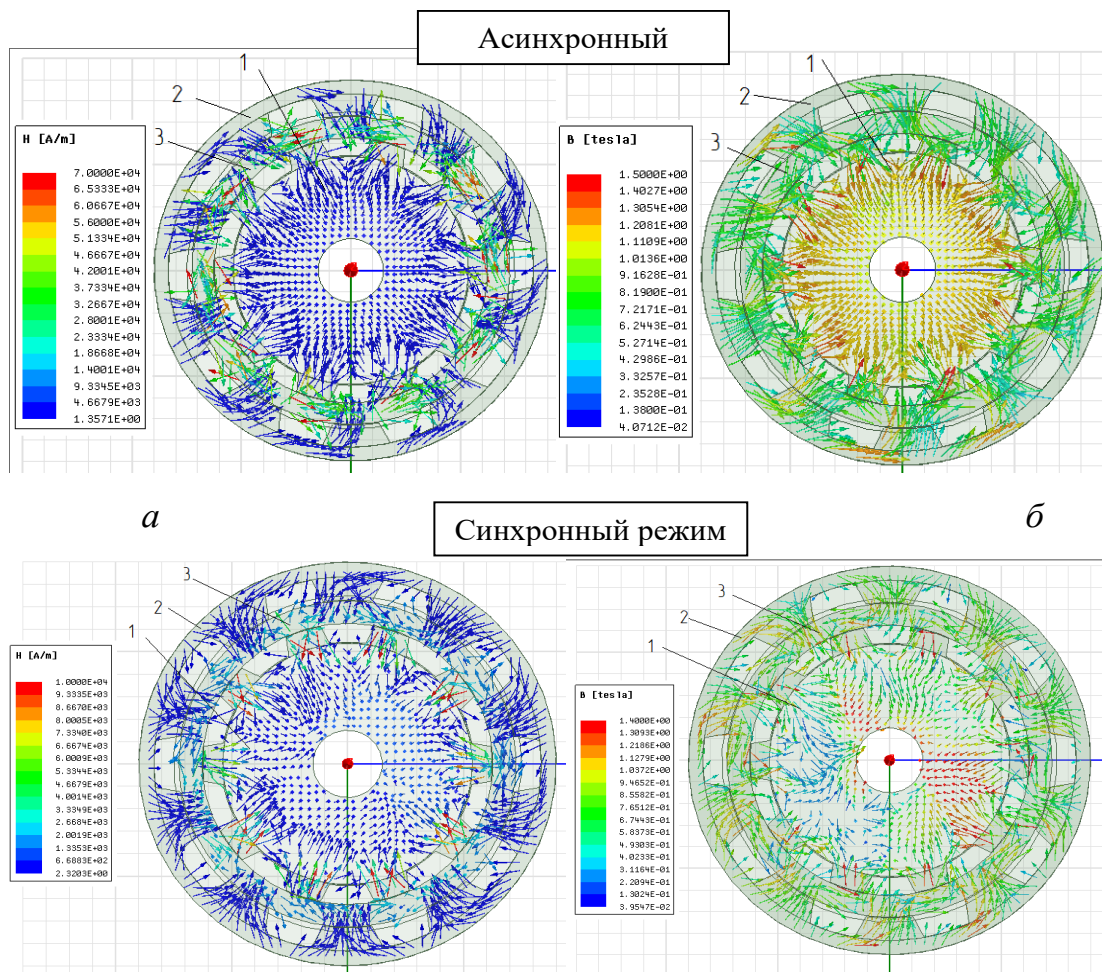


Рис. 6. Вектор напряженности (а) и индукции (б) магнитного поля ЭМГМ в различных режимах работы: 1 – внутренний индуктор; 2 – наружный индуктор; 3 – гистерезисный слой

В третьей главе приведена оптимизация геометрических размеров зубцовой зоны ЭМГМ, а также на основе уравнений Максвелла проведены исследования процессов распространения магнитного поля в гистерезисном слое в зависимости от частоты вращения ведущего вала относительно гистерезисного слоя, связанного с ведомым валом.

На рис. 7 представлен фрагмент зубцовой зоны ЭМГМ из магнитомягкого материала и гистерезисного слоя. Из рисунка следует, что в зависимости от относительного сдвига зубцов внутреннего и наружного индуктора точка « m », представляющая собой элементарный объем гистерезисного материала, в асинхронном режиме испытывает различные воздействия от изменяющегося магнитного поля. На рис. 7 *а, в* элементарный объем « m » перемагничивается по полному циклу петли гистерезиса материала при тангенциальном поле по траектории $a-b-c-d-e-f-a$, а на рис. 7 *б, в* – по частному циклу петли при радиальном поле по траектории $a-b-c-d-a$, что в обоих случаях можно отнести к линейному перемагничиванию и пользоваться видом петли гистерезиса, получаемых при помощи «классических» установок по снятию петель.

В общем случае, в зависимости от толщины гистерезисного слоя, величины воздушного зазора и геометрии зубцовой зоны картина распределения магнитного потока может выглядеть сложнее, с элементами вращательного гистерезиса.

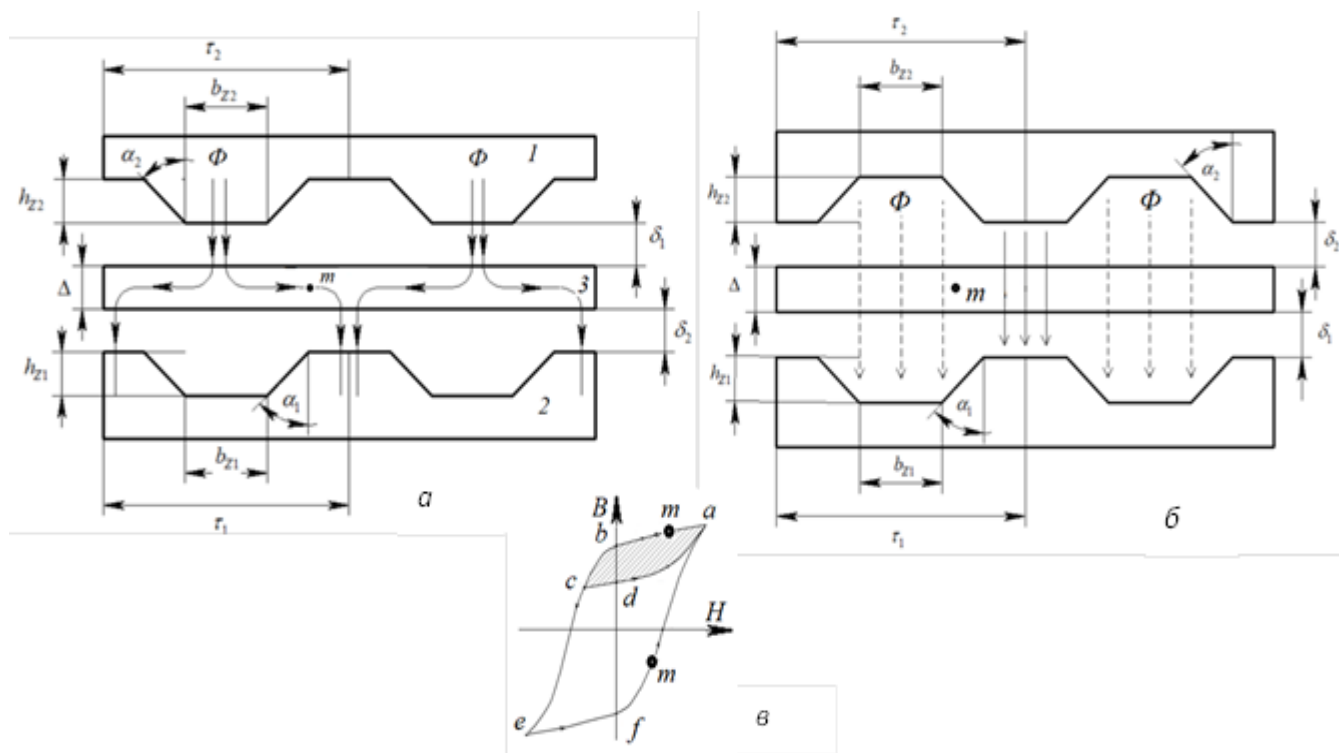


Рис. 7. Фрагмент зубцовой зоны ЭМГМ:

1,2 – наружный и внутренний индуктор; 3 – гистерезисный слой; *а* – тангенциальное перемагничивание; *б* – радиальное перемагничивание; *в* – траектория точки « m »

Результаты имитационного моделирования ЭМГМ представлены на рис. 8-10. Как следует из рис. 6, представляющего картину распределения магнитного поля в плоском разрезе муфты в асинхронном режиме, вектор магнитной индукции в

зубцовой зоне в общем случае совершает колебания около радиального направления. При этом радиальная составляющая магнитного поля практически не изменяется, поскольку суммарная величина воздушных зазоров при движении точки « m » остается постоянной. Такое перемагничивание материала можно характеризовать как частичное вращательное, в результате чего точка « m », характеризующая элементарный объем активного слоя, совершает движение по симметричному частному циклу петли гистерезиса под воздействием тангенциальной составляющей поля.

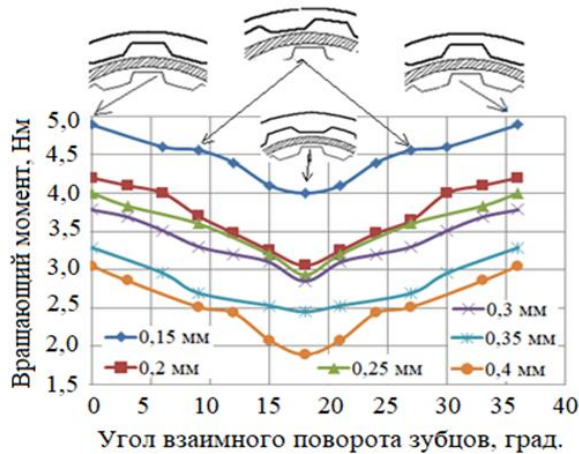


Рис. 8. Зависимость вращающего момента ЭМГМ от взаимного расположения зубцов индукторов и величины воздушного зазора

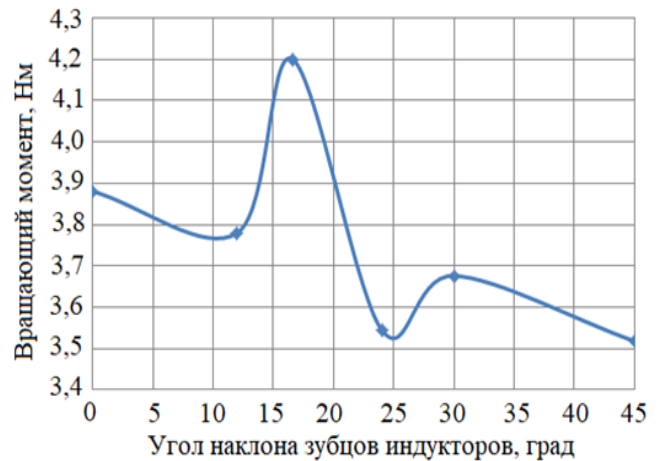


Рис. 9. Зависимость вращающего момента ЭМГМ от угла наклона зубцов индукторов

Что касается конструкции зубцов, то, как следует из результатов моделирования, существует некоторое оптимальное значение угла наклона зубцов индукторов, при котором развивается наибольший вращающий момент (рис. 10). Физическое обоснование этого факта состоит в следующем.

При постоянстве величин воздушных зазоров δ_i , толщины гистерезисного слоя Δ , размерах h и r наклон зубцов сопровождается изменением ширины зубцов b и угла наклона α . При этом угол α изменяется от нуля до некоторого предельного значения $\alpha_{\text{пр}} = \arctg(r/2h)$ при получении зубцов треугольной формы и $b = 0$. При нулевом угле α зубцы имеют форму прямоугольника. При уменьшении ширины зубцов и увеличении угла α начинается снижение величины общего магнитного потока Φ ввиду возрастания магнитного сопротивления эквивалентного воздушного зазора, что ведет к снижению момента ЭМГМ. Дальнейшее увеличение угла α и уменьшение ширины зубцов b приводит к возрастанию тангенциальной составляющей магнитного потока и резкому увеличению момента.

При дальнейшем увеличении угла α на фоне снижения общего магнитного потока и его тангенциальной составляющей момент ЭМГМ снижается. Однако, при уменьшении ширины зубцов происходит их локальное насыщение и, как следствие, некоторое увеличение тангенциальной составляющей индукции.

Дальнейшее увеличение угла до предельного значения $\alpha_{\text{пр}}$ вырождает зубцы в треугольные при снижении магнитного потока и момента муфты. Таким

образом, в графике зависимости вращающего момента ЭМГМ от наклона зубцов внутреннего и внешнего индукторов наблюдаются два экстремума.

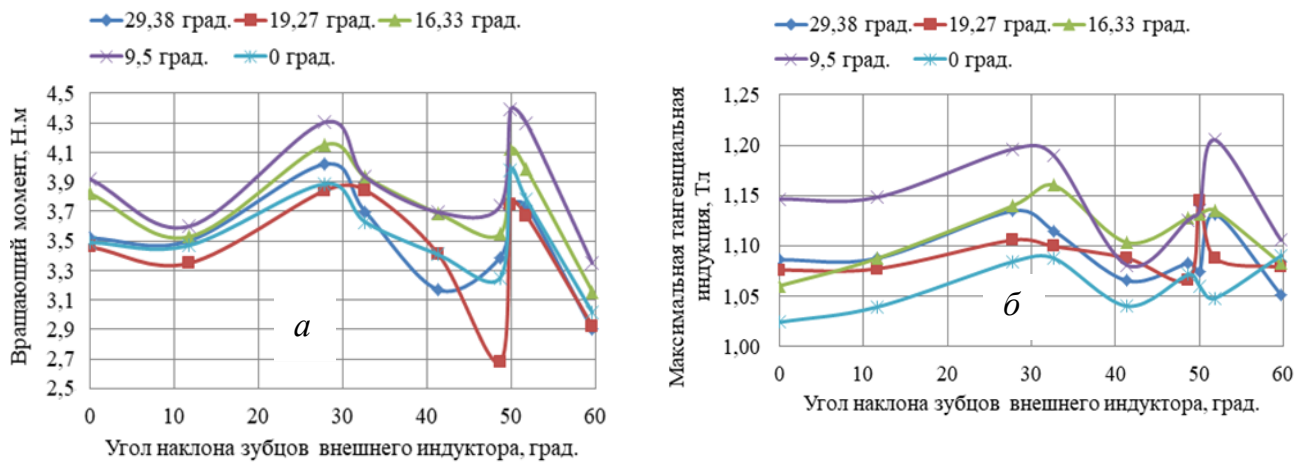


Рис. 10. Зависимости вращающего момента (а) и максимальной тангенциальной индукции (б) от угла наклона зубцов внешнего индуктора при разных углах наклона зубцов внутреннего индуктора при числе зубцов $z = 10$

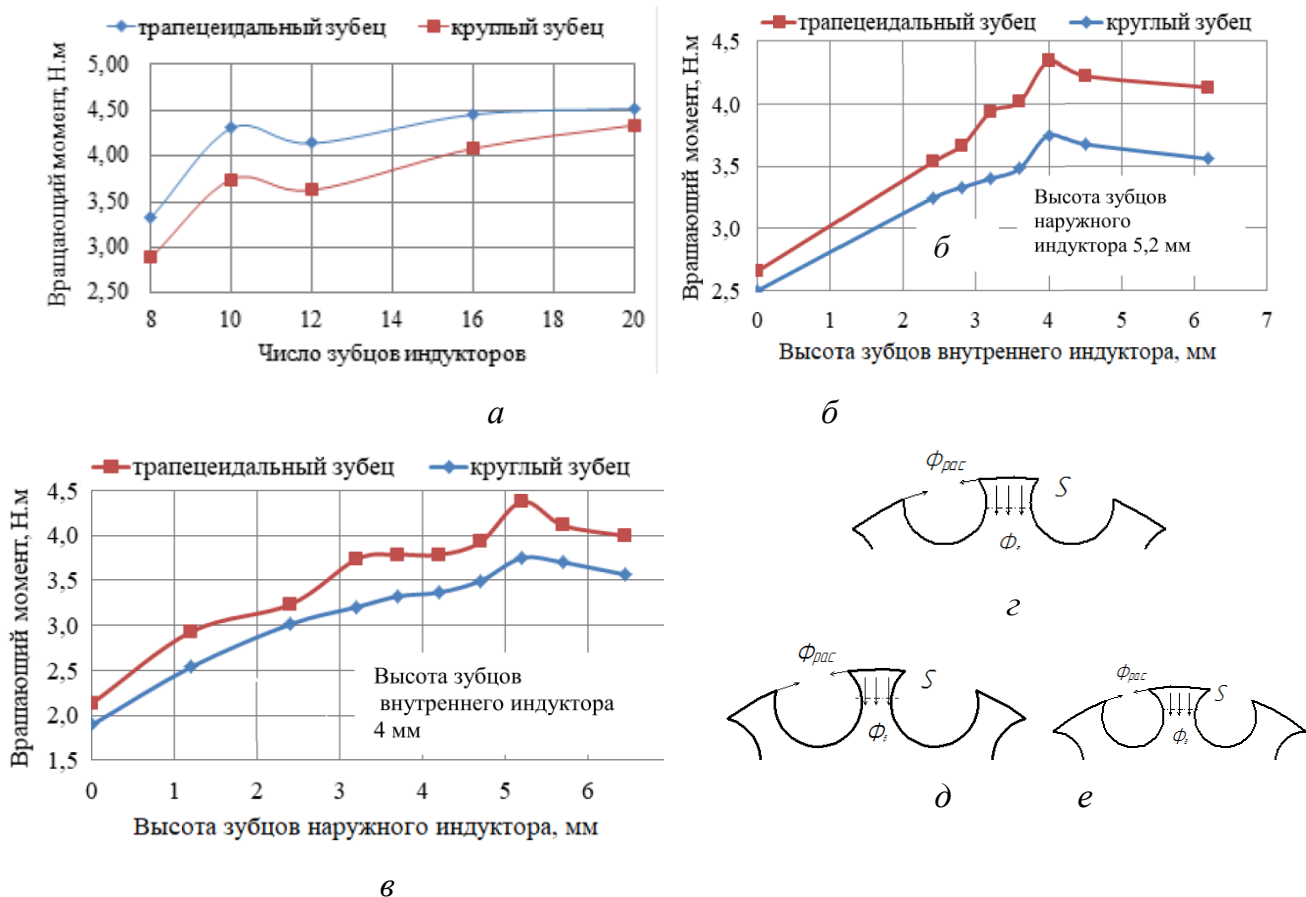


Рис. 11. Зависимость вращающего момента ЭМГМ от числа зубцов индукторов при различных формах пазов (а), размеров зубцов индукторов (б, в) и фрагмент зубцовой зоны с круглыми пазами (г-е).

В случае проведения экспериментов при варьировании параметров зубцов лишь внешнего индуктора при постоянных значениях наклона и ширины зубцов

внутреннего индуктора зависимость момента от угла наклона принципиально такая же (см. рис. 10 а) при некоторых количественных отличиях. В вычислительном эксперименте также фиксировалось значение тангенциальной составляющей индукции в гистерезисном слое муфты (рис. 10 б). Как следует из рис. 10 б оптимальным значением углов наклона зубцов следует считать значения $\alpha = 9,5^\circ$ для внутреннего индуктора и $\alpha = 27,8^\circ; 50^\circ$ для наружного индуктора. Варьирование шириной зубцов индукторов приводит к аналогичным зависимостям.

Также в процессе исследования проводилось сравнение эффективности 2-х форм зубцов – трапецеидальной и круглой. Согласно исследованиям трапецеидальные зубцы более эффективны (см. рис.11).

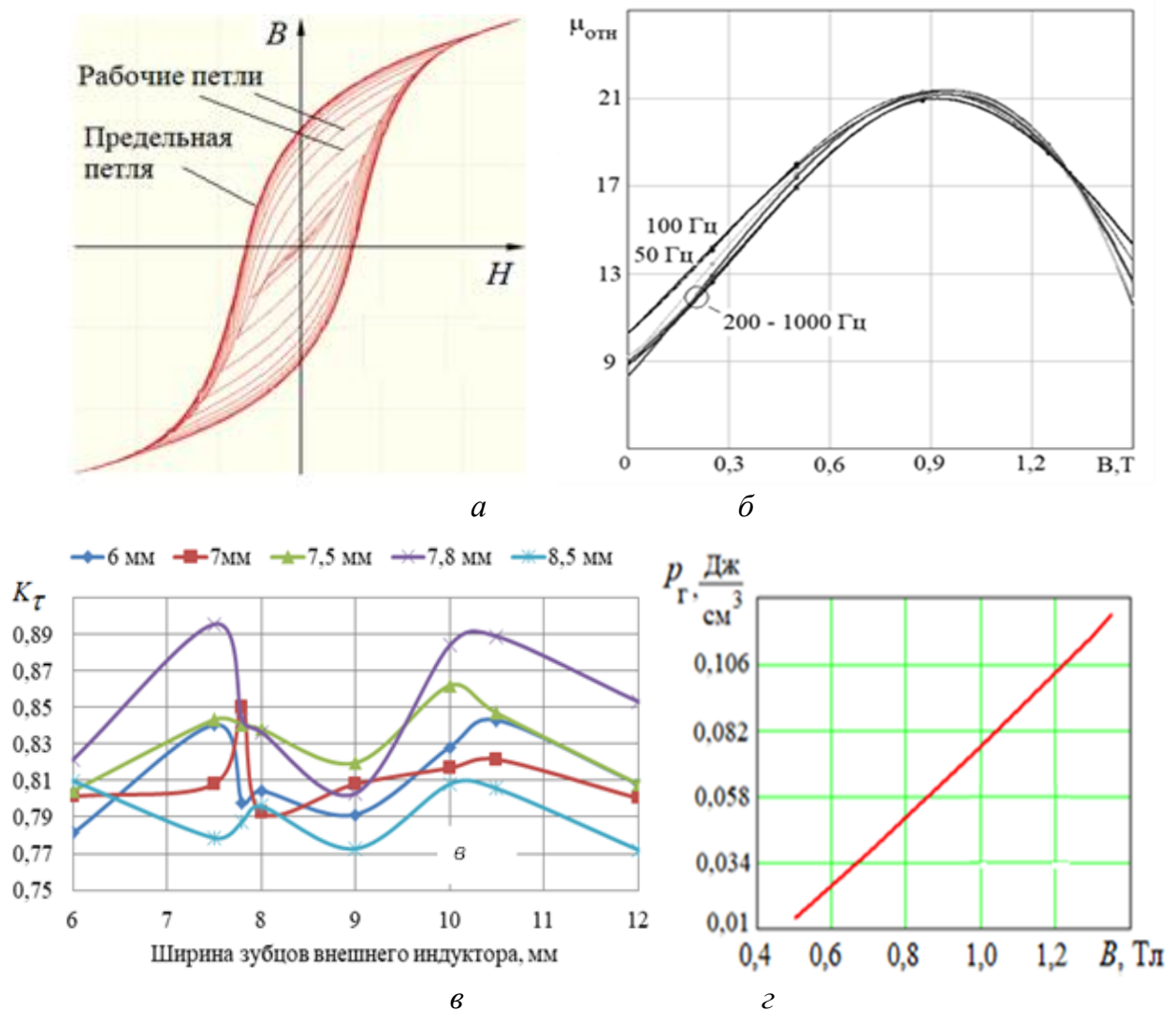


Рис.12. Семейство петель гистерезиса (а), относительная магнитная проницаемость (б), кривые коэффициента использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей индукции в зависимости от ширины зубцов (в) и удельные гистерезисные потери (г) в функции от индукции для материала Fe-Cr-Co 22X15KA (кривая $\mu = F(B)$ дана при различных частотах перемагничивания).

Как было отмечено выше, электромагнитный момент и эффективность ЭМГМ определяются тангенциальной составляющей магнитного потока в

гистерезисном слое. Для оценки указанной эффективности был введен коэффициент использования гистерезисного слоя по тангенциальной составляющей магнитного поля:

$$K_{\tau} = \frac{p_{\text{раб}}}{p_{\text{max}}} = \frac{\oint H_{\text{раб}} dB}{\oint H_{\text{max}} dB}, \quad (1)$$

где p_{max} , $p_{\text{раб}}$ и H_{max} , $H_{\text{раб}}$ - удельные потери на гистерезис и напряженность поля при максимальной и рабочей индукции соответственно.

На рис. 12 а представлено семейство петель гистерезиса материала Fe-Cr-Co (сплав 22Х15КА), полученное на установке контроля магнитных параметров УКМП-0,05-100, на основе чего были получены зависимости удельных гистерезисных потерь $p_{\text{г}}$ от индукции (рис. 12 з), а также магнитная проницаемость гистерезисного материала от индукции и частоты перемагничивания (рис.12 б).

Фактически круговые интегралы в выражении (1) представляют из себя площади петель гистерезиса в соответствии с рис. 12 а. При этом тангенциальная составляющая индукции B_{τ} может быть представлена как

$$B_{\tau} = \mu_0 \mu H_{\tau}, \quad (2)$$

где μ_0 и μ - соответственно магнитная проницаемость вакуума и относительная магнитная проницаемость гистерезисного материала,

а выражение для момента ЭМГМ при объеме гистерезисного слоя $V_{\text{г}}$ примет вид:

$$M_{\text{г}} = p_{\text{г}} V_{\text{г}} K_{\tau} \quad (3)$$

Ротор ЭМГМ в отличие от индуктора испытывает воздействие от гармоник магнитного поля, временная форма которого в воздушном зазоре определяется формой зубцов внутреннего и внешнего индукторов, а процесс распространения поля подчиняется уравнениям Максвелла, описывающих динамику процессов намагничивания. Задача анализа для ЭМГМ конкретизируется рассмотрением поверхностного эффекта при проникновении волны магнитного поля в ферромагнитное полупространство – гистерезисный слой, на частотах, соответствующих возможным скоростям вращения. Для типичного применения ЭМГМ в ЭПЗА характерны скорости вращения до $n = 6000$ об/мин, что при выборе количества зубцов, например, $z=20$ соответствует частоте перемагничивания гистерезисного слоя в точке «m» (см. рис. 7) $f_m = zn/60 = 2000$ Гц. В работе проанализирована глубина проникновения поля и снижение амплитуды основной гармоники для максимального значения $n = 12000$ об/мин ($f_m = 4000$ Гц).

Для вектора напряженности поля $\mathbf{H}$ исходным уравнением для поставленной задачи можно считать одно из следствий уравнений Максвелла

$$\text{rot rot } \mathbf{H} = \lambda^2 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (4)$$

где $\lambda = 0,57 \sqrt{\frac{\pi \mu}{\rho}}$; ρ - удельное электрическое сопротивление гистерезисного слоя.

Общим решением уравнения (4) в комплексной форме является выражение (5):

$$H(y,t) = H(y)e^{j\omega t} = H_m e^{-\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2}}y} e^{j(\omega t - \lambda\sqrt{\frac{\omega}{2}}y)}, \quad (5)$$

где его действительная часть при координате глубины y является решением вышеозначенной задачи:

$$H = H_m e^{-\lambda\sqrt{\frac{\omega}{2}}y} \cos \omega(t - \frac{\lambda y}{\sqrt{2\omega}}) \text{ при фазе } \varphi = \frac{\omega \lambda y}{\sqrt{2\omega}}, \quad (6)$$

В среднем значении гармоники поля с номером ν в гистерезисном слое дополнительно ослабляются в $1/k_{\nu\Delta}$ раз, что может быть оценено следующим выражением:

$$k_{\nu\Delta} = \frac{\int_0^\Delta H(y)dy}{\Delta} \quad (7)$$

Тогда выражение (3) для гистерезисного момента ЭМГМ для первой гармоники можно представить следующим образом:

$$M_\Gamma = p_\Gamma V_\Gamma K_\tau k_{1\Delta} \quad (8)$$

Результаты исследования процессов распространения поля в толщу гистерезисного слоя ЭМГМ на основе Fe-Cr-Co представлены на рис. 13.

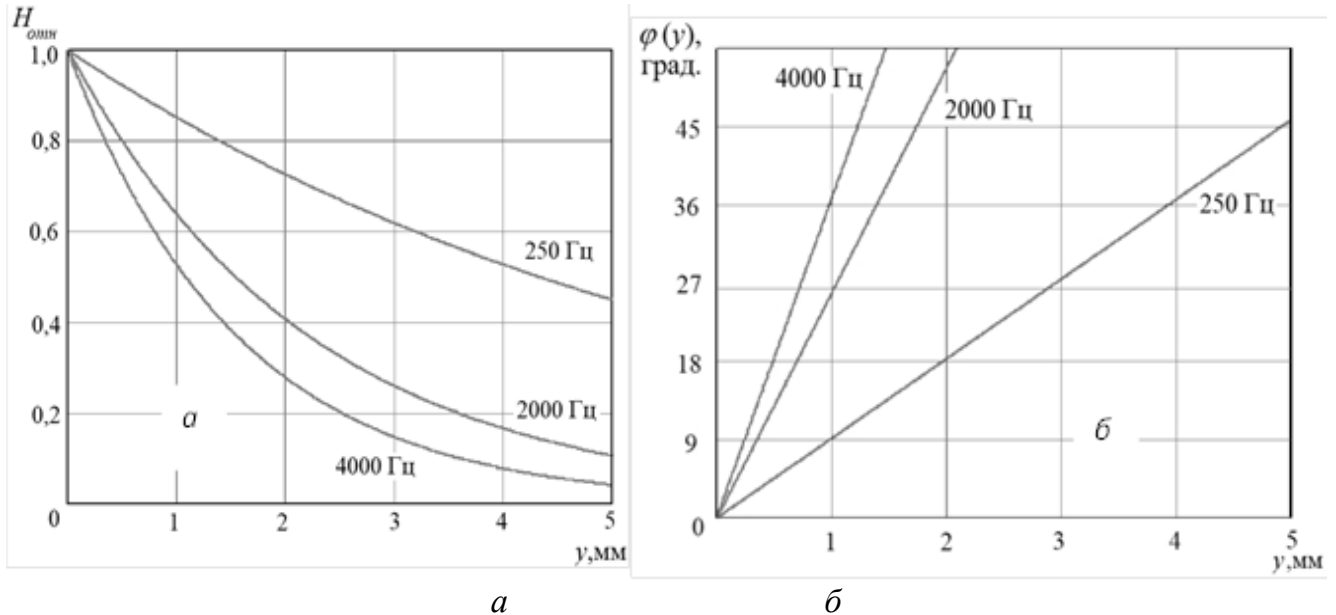


Рис. 13. Относительная амплитуда (а) и фаза (б) гармоник поля при проникновении в гистерезисный слой ЭМГМ

На основе полученной автором зависимости коэффициента ослабления поля $k_{1\Delta}$ от частоты для материала Fe-Co-Cr (рис. 14) для инженерных расчетов предложено пользоваться выражением (9), связывающим момент ЭМГМ со скоростью вращения приводного вала и числом зубцов индуктора:

$$M_\Gamma = p_\Gamma V_\Gamma K_\tau e^{-0,02\sqrt{\frac{Zn}{60}}} \quad (9)$$

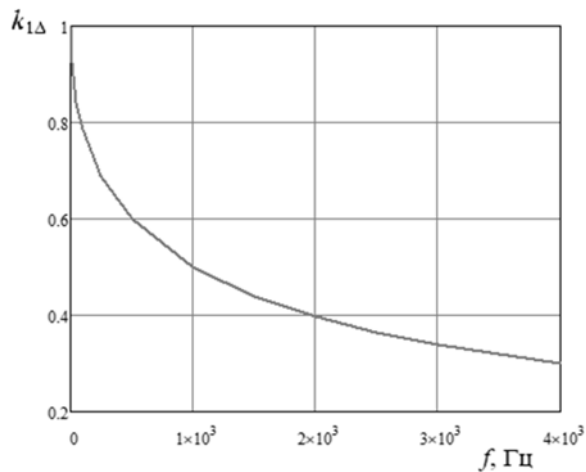


Рис. 14. Зависимость коэффициента ослабления поля $k_{1Δ}$ от частоты для материала Fe-Co-Cr

В четвертой главе проанализированы четыре типа ЭМГМ, конструкции которых представлены на рис.1. Номинальные мощности АД, использующиеся в ЭПЗА, находятся в пределах от 250 Вт до 7500 Вт в зависимости от диаметров трубопровода. Идея проектирования единственной ГМ, работающей на всех мощностях нецелесообразна. При постоянстве диаметра гистерезисного слоя, регулирование мощности ГМ можно осуществить также путем изменения длины гистерезисного слоя как составляющей объема. Таким образом, можно проектировать серии муфт, работающих на нескольких номинальных мощностях. Выбранными для проектирования мощностями ГМ являются 550 Вт, 2,2 кВт и 7,5 кВт. Для указанных мощностей в работе получены регулировочные характеристики и проведена оценка массогабаритных показателей ЭМГМ (рис.15, 16).

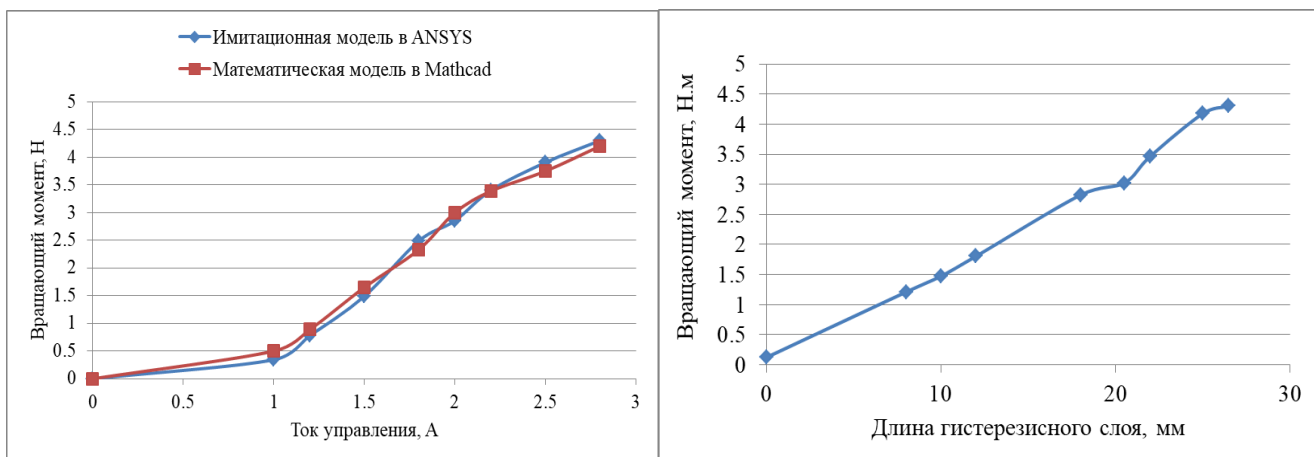


Рис. 15. Зависимость вращающего момента от тока управления и длины гистерезисного слоя ЭМГМ мощностью 0,55 кВт при рабочем зазоре 0,2 мм.

Из представленных в анализе ГМ наиболее предпочтительным для использования в ЭПЗА можно считать муфту с неподвижной внутренней обмоткой возбуждения, однако, представляет интерес конструкция с неподвижной внешней обмоткой, позволяющая обеспечить работу во взрывоопасной зоне при организации бесконтактного управления муфтой в непосредственной близости с нефте- или газопроводом.

Поскольку мощность управления при задании момента ограничения для всех типов ЭМГМ не превышает 130 Вт, блок управления легко реализуется

схемами на основе управляемых выпрямителей, *DC-DC* – преобразователей или магнитных усилителей. В работе предложены технические решения реализации ЭПЗА.

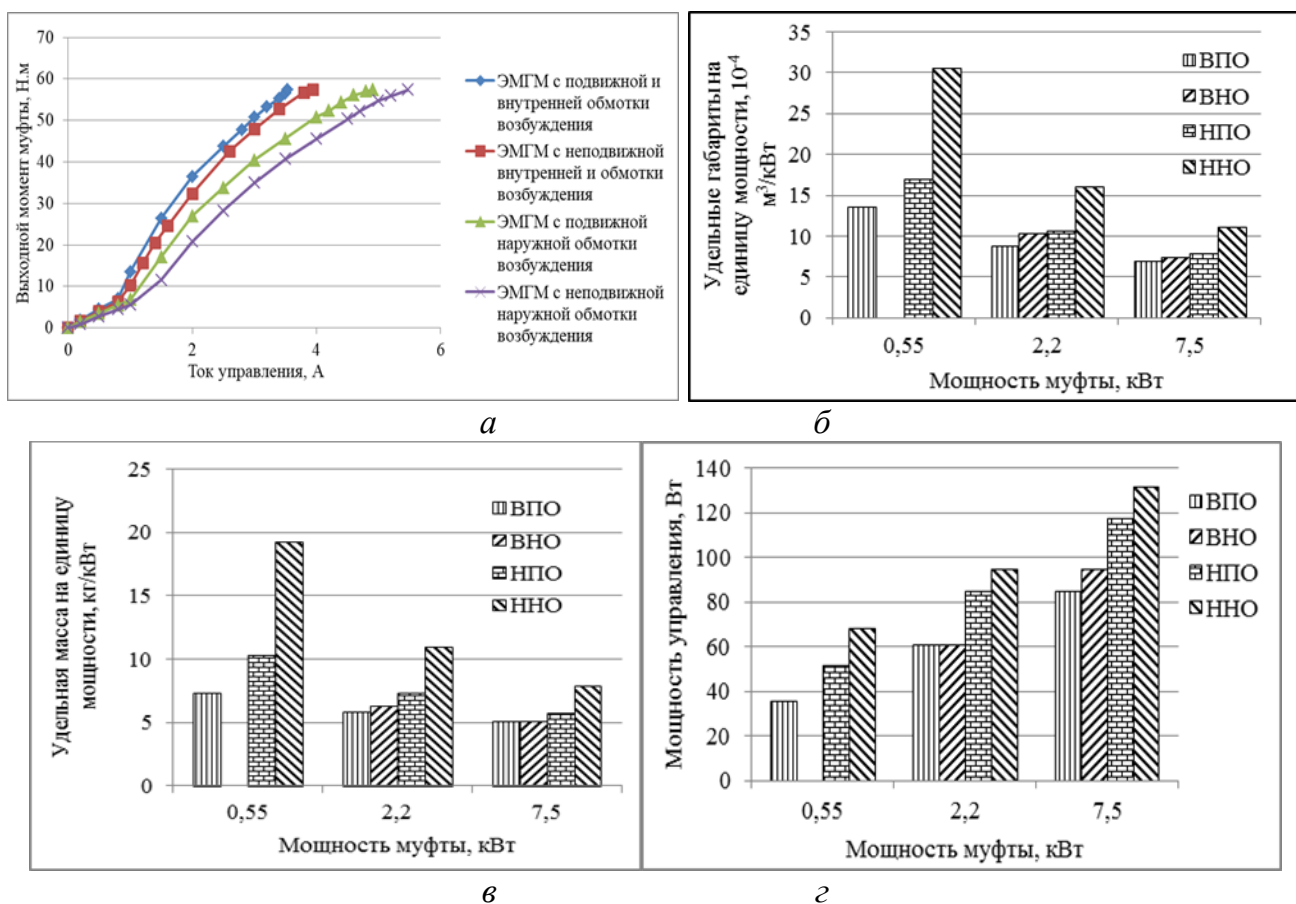


Рис. 16. Зависимость вращающего момента от тока управления ЭМГМ мощностью 7,5 кВт (а); удельные габариты (б); удельная масса (в) и мощность управления (z) для различных конструкций при рабочем зазоре 0,4 мм.

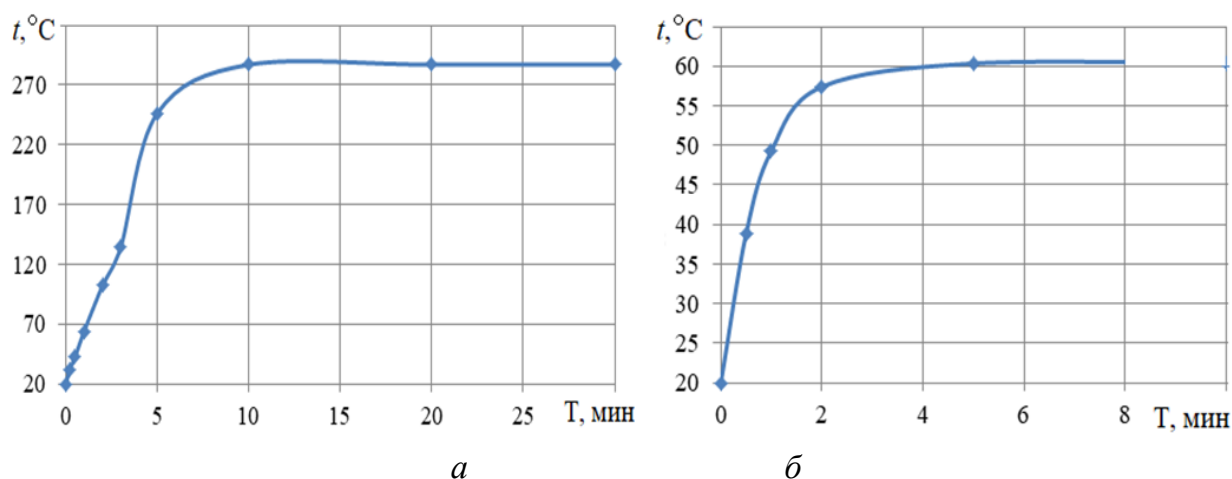


Рис. 17. Температура гистерезисного слоя от времени работы ЭМГМ после остановки ведомой части при охлаждении: а – в воздухе; б – в масле.

После того как трубопровод полностью открывается или закрывается, вращение гистерезисного слоя также прекращается с выделением тепла от гистерезисных потерь. В работе проведен тепловой расчет ЭМГМ, который

показал, что максимальная температура неподвижного гистерезисного слоя, связанного с ведомой полумуфтой имеет значение порядка 290°C лишь через 10 минут при работе в заторможенном режиме – при охлаждении воздухом, что даже для такого нереального режима для сплава Fe-Cr-Co не критично, и 60°C – при охлаждении в масле (рис. 17). При этом температура обмотки не превышает значений соответственно 170°C и 45°C .

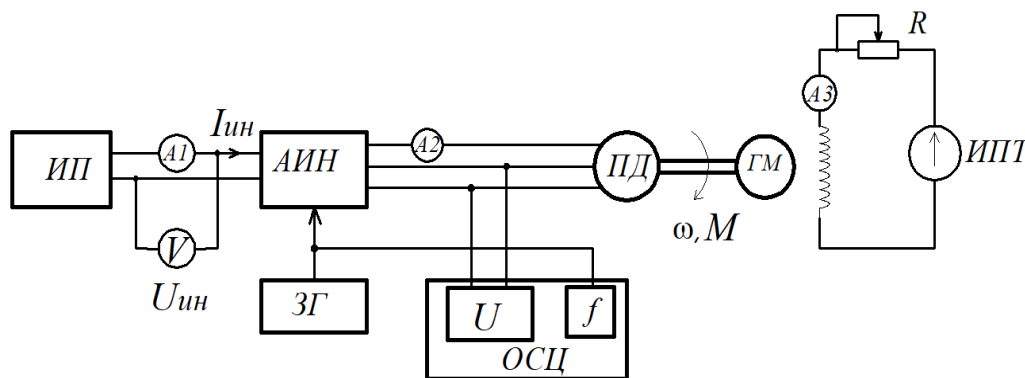
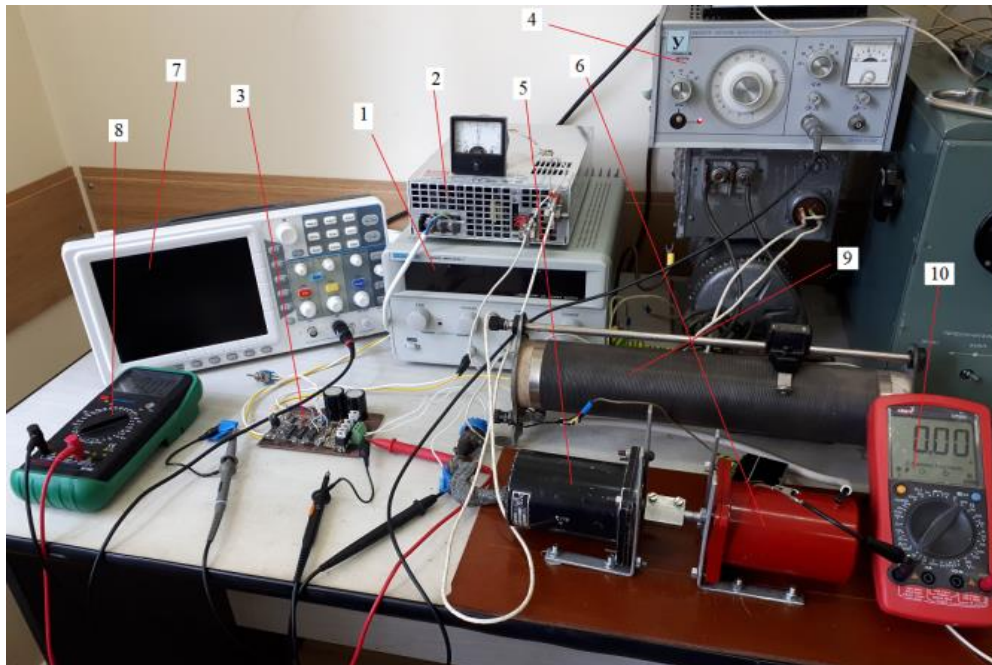


Рис.18. Экспериментальная установка и ее схема для исследования регулировочных характеристик ЭМГМ (1, 2 – источник постоянного тока; 3 – автономный трехфазный инвертор напряжения; 4 – задающий генератор; 5 – приводной двигатель; 6 – электромагнитная гистерезисная муфта; 7 – осциллограф; 8, 10 – амперметры; 9 – реостат)

Теоретические положения диссертации были подтверждены экспериментами на установке (рис.18), позволяющей исследовать регулировочные характеристики при различных частотах перемагничивания гистерезисного слоя за счет регулирования частоты вращения ПД с помощью автономного инвертора напряжения. Макетный образец муфты представляет из себя ЭМГМ с неподвижной обмоткой управления с гистерезисным слоем из материала Fe-Co-Cr

22Х15КА объемом $7,2 \text{ см}^3$ при $z = 4$ и мощностью 60 Вт. Проведенные эксперименты подтверждают теоретические исследования по глубине проникновения электромагнитного поля в толщу гистерезисного слоя при снижении момента ЭМГМ при увеличении частоты перемагничивания. Экспериментальные данные (рис.19) отличаются от расчетных с оценкой по кривой рис. 14 не более, чем на 8%. Экспериментальная регулировочная характеристика отличается от расчетной не более, чем на 12%.

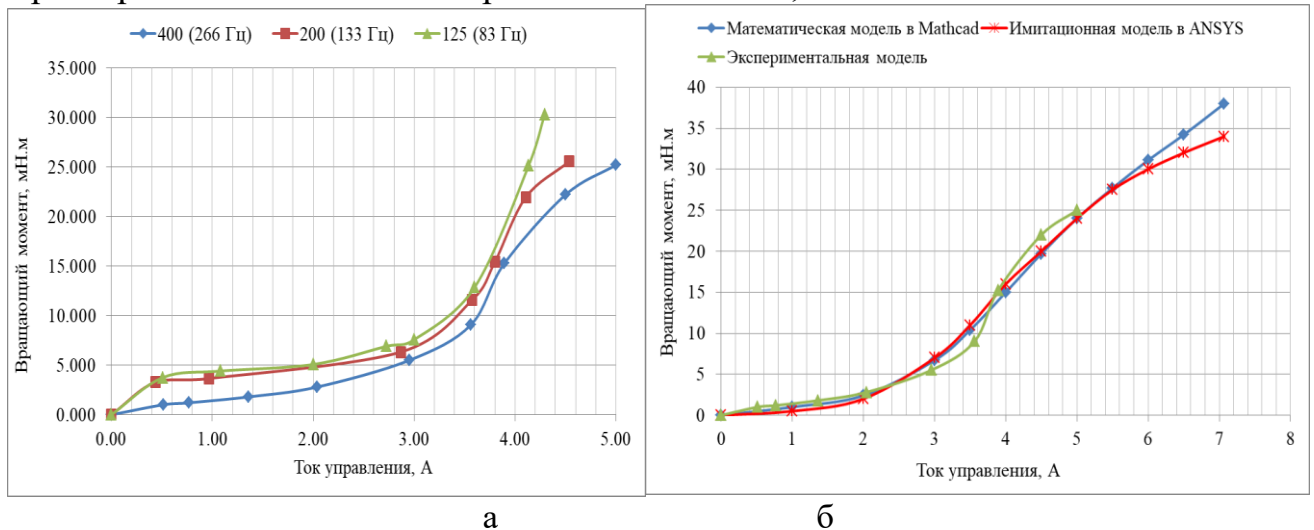


Рис. 19. Регулировочные характеристики экспериментальной ЭМГМ: а – при различных частотах перемагничивания гистерезисного слоя; б – сравнение экспериментальных и расчетных характеристик

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнены исследования по возможности применения ЭМГМ на основе магнитотвердого сплава Fe-Cr-Co в электроприводах запорной арматуры нефтегазопроводов.

1. Проведен анализ трубопроводной арматуры и электроприводов, на основе которого выявлены перспективы применения гистерезисных муфт в составе электроприводов запорной арматуры.
2. Разработаны алгоритм и методика расчета ЭМГМ, применяемых в электроприводе трубопроводной арматуры.
3. Проведены математическое и имитационное моделирование ЭМГМ, сделаны сравнительные анализы полученных результатов.
4. На основе имитационного моделирования проведена оптимизация геометрических размеров зубцовой зоны с целью достижения максимального вращающего момента при фиксированных габаритах и весе.
5. Проведена оценка теплового состояния ЭМГМ при перемагничивании гистерезисного слоя в режиме уплотнения (вытяжки) клина ЗА.
6. Получены регулировочные характеристики ЭМГМ.
7. Проведена оценка массогабаритных показателей вариантов ЭМГМ.

8. На основе анализа распространения магнитного поля в толщу гистерезисного слоя проведена оценка рабочего диапазона скорости вращения ЭМГМ.
9. Предложены технические решения реализации ЭП ЗА на основе ЭМГМ.
10. Для проверки теоретических исследований и выводов изготовлен макетный образец ЭМГМ, на котором проведены физические эксперименты.

Научные публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Гарганеев А. Г. Электропривод задвижки трубопроводной арматуры с гистерезисной муфтой / А. Г. Гарганеев, Д. К. Кюи, Е. И. Кашин // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 127–131.
2. Гарганеев А.Г., Гистерезисные муфты на основе материала Fe-Cr-Co / А.Г. Гарганеев, Д.К. Кюи, Е.И. Кашин, Н.Ю. Сипайлова // Горное оборудование и электромеханика - 2018. -№ 4 (138). - С. 33-38.
3. А.Г. Гарганеев, Д.К. Кюи. Анализ процессов намагничивания гистерезисного слоя в электромагнитной муфте на основе материала Fe-Co-Cr//Электропитание – 2019. - №1 – С. 35-44.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и WoS

4. Гарганеев А. Г. Оптимизация геометрии зубцовой зоны гистерезисной муфты запорной арматуры нефтепровода / А.Г. Гарганеев, Д.К. Кюи, Н.Ю. Сипайлова, Е.И. Кашин, // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов – 2019.– Т.330, № 7. – С.155 – 164.
5. Garganeev, A. G. Regulation Characteristics of Hysteresis Clutches Based on the Fe-Cr-Co Material / Garganeev, A. G., Kyui, D. K., Kashin, E. I., & Sipaylova, N. Y. // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – P. 115 – 118.
6. Garganeev, A. G. Hysteresis clutch in the electric drive of pipeline valves / Garganeev, A. G., Kyui, D. K., Kashin, E. I., & Sipaylova, N. Y. // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. – 2018. – P. 655-658.
7. Garganeev, A. G. Simulation of Hysteresis Clutches in ANSYS MAXWEL / Garganeev, A. G., Kyui, D. K., Sipaylova, N. Y., & Fedorov D.N. // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. – 2019. P. 731-734.