

На правах рукописи



Малыгин Игорь Вячеславович

Исследование возможности применения трехфазного якоря с кольцевыми обмотками в электрических машинах малой мощности в условиях воздействия радиационных полей

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Пластун Анатолий Трофимович

Официальные оппоненты: Ганджа Сергей Анатольевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государствен-
ный университет (национальный исследова-
тельский университет)», г. Челябинск,
заведующий кафедрой теоретических основ
электротехники;

Приступ Александр Георгиевич,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», г. Новосибирск,
доцент кафедры электромеханики

Ведущая организация Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Защита состоится «06» марта 2019 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д **212.285.03** на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=287275>

Автореферат разослан « ____ » _____ 20 ____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В современной ядерной энергетике в течение ряда последних лет наметился переход от открытого ядерного топливного цикла, предполагающего захоронение ядерных отходов и отработанного ядерного топлива, к замкнутому ядерному циклу, где большая часть радиоактивного материала перерабатывается и используется повторно.

Ядерная энергетика это один из важнейших секторов экономики России, в ближайшие годы её рост будет только увеличиваться, вне зависимости от тенденций перехода на возобновляемые и альтернативные источники энергии. Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» производство атомной энергии планируется увеличить в 2 раза к 2030 году.

Увеличение производства атомной энергии неизбежно повлечет за собой увеличение количества ядерных отходов, в связи с чем возникнет необходимость строить предприятия по переработке радиоактивных отходов.

Одной из главных составных частей обрабатывающих установок в камерах являются электродвигатели малой и средней мощности с органической изоляцией, призванные работать в условиях воздействия радиационных полей и других экстремальных внешних факторов.

Для защиты от радиации электродвигатели выносят за защитную стену камеры, что приводит к применению в конструкции камер больших проходов с длинными передающими вращение валами и организации дополнительных помещений для размещения электродвигателей.

Дальнейшее развитие технологии переработки ОТВС и РАО предполагает непосредственное сопряжение электродвигателей и установок по переработке радиоактивных компонентов внутри радиационно-защитной камеры. Таким образом, главным требованием, предъявляемым к современным образцам электрических двигателей для атомной энергетике, является отсутствие органических изоляционных материалов в их конструкции.

На сегодняшний день и отечественные, и зарубежные производители электрических двигателей для увеличения их срока службы прибегают к усилению изоляции обмоточного провода насыпной обмотки, предназначенного для обмотки именно классических статоров электрического двигателя переменного тока малой и средней мощности. Предлагаются как гибридные (соединения неорганических веществ на органическом связующем), так и полностью неорганические типы изоляции. Цель применения данных материалов – достижение стабильных электроизоляционных свойств и долговечности при высоких температурах, высокой радиации. Радиационная стойкость предлагаемых неорганических материалов достигает 10^{17} рад, в то время как радиационная стойкость органических материалов составляет 10^9 рад. Конструкции же магнитных систем двигателей практически никак не совершенствуются, что приводит к

ограничениям в использовании материалов, связанных с малой прочностью неорганической изоляции при деформации на изгиб.

Таким образом, можно заключить, что назрела необходимость разработки такой конструкции электродвигателя малой и средней мощности, которая позволила бы наиболее эффективно использовать неорганические изоляционные материалы.

Конструкцией электродвигателя, позволяющей максимально эффективно использовать неорганические изоляционные материалы, может стать конструкция якоря трехфазной машины переменного тока, выполненная по патенту РФ 2121207.

Согласно патенту РФ 2121207, эффективное использование неорганических изоляционных материалов обусловлено кольцеобразной формой катушек обмотки якоря, что позволяет обеспечить равномерный изгиб по всей длине обмоточного провода и минимизировать механическое воздействие, оказываемое на него в процессе изготовления катушки. Вращающееся магнитное поле в рабочем воздушном зазоре при обмотке в форме кольцеобразных катушек, оси которых совпадают между собой и совпадают с осью вращения ротора, создаётся с помощью специальным образом организованной магнитной системы.

Известны конструкции электрических машин, в которых в качестве катушек обмотки якоря могут быть применены катушки кольцевого типа. Такими электрическими машинами являются электрические машины с аксиальным потоком и цилиндрические линейные электрические машины. Вопросы, касающиеся данного типа электрических машин, в открытой печати освещены достаточно широко и представлены работами авторов Гайтова, Б.Х., Гуйдалаева М.Г., Ганджи С.А., Казакова Ю.Б., Леонова С.В. Федянина А.Л., Байбакова М.С., Коняева А.Ю., Шулакова Н.В., Шутемова С.В. и др. Однако рассмотренные конструкции электрических машин имеют существенные отличия от исследуемой: в электрической машине с аксиальным магнитным потоком оси катушек обмотки якоря не совпадают с осью вращения ротора, но параллельны ей, и не совпадают между собой, а в цилиндрических линейных электрических машинах якорем создается магнитное поле с линейным перемещением относительно статора.

Тема разработки конструкций электрических машин малой мощности с кольцевыми обмотками, оси которых совпадают с осью вращения вала ротора и между собой, и магнитная система которых создает вращающееся относительно ротора магнитное поле, позволяющих максимально эффективно применять провода с неорганической изоляцией, освещена нешироко. Патентный поиск показал, что существуют отличные от исследуемой конструкции варианты электрических машин, такие как в патентах RU 2306657 и RU 2496213, в которых, благодаря конструкции обмотки, могла бы быть применена неорганическая изоляция. Данные конструкции статоров электрических машин так же имеют катушки обмотки кольцевого типа, однако каждая фаза обладает собственной магнитной системой, в то время как исследуемая конструкция обладает общей магнитной системой для всех m фаз.

Так же в указанных патентах предлагаемые конструкции рассматриваются как конструкции синхронных машин. Исследуемая конструкция якоря, основанная на патенте РФ 2121207, может быть использована как в синхронных, так и в асинхронных машинах.

Цель работы: моделированием и экспериментальным исследованием подтвердить или опровергнуть справедливость принципа формирования многополюсного переменного магнитного поля в электрической машине с кольцевыми обмотками при общей магнитной системе для всех фаз.

Задачи работы: создание способа расчета электромагнитного момента электрической машины с кольцевыми обмотками в пакете ANSYS, исследование влияния геометрических размеров элементов магнитной цепи якоря с кольцевыми обмотками на результирующий электромагнитный момент, расчет радиальных сил, действующих на зубцовые наконечники, разработка, изготовление и испытание экспериментального образца асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (АДКО), разработка рекомендаций по проектированию электромагнитного ядра АДКО.

Научная новизна работы:

1. Разработан способ расчета электромагнитного момента электрической машины с кольцевыми обмотками в пакете ANSYS.
2. Определены рекомендуемые максимальные значения магнитной индукции по участкам магнитной цепи якоря с кольцевыми обмотками.
3. Разработан и экспериментально подтвержден способ подавления электромагнитных моментов от высших гармоник (кратные 5 и 7) в результирующей кривой электромагнитного момента асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками.
4. Экспериментально подтверждена возможность создания заданного числа пар полюсов при минимально возможном числе катушек якорной обмотки равном $2m$.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Впервые разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками с фазной зоной $\pi/3$ и диаметральный шагом.
2. Предложен отличный от патента РФ 2121207 способ уменьшения величин максимальных электромагнитных моментов высших нечетных гармоник (кратных 5 и 7) путем формирования магнитной системы.
3. На основе удельного окружного усилия обоснована возможность применения рекомендованных значений индукции по участкам магнитной цепи якоря синхронной машины с кольцевыми обмотками к асинхронной машине с кольцевыми обмотками.
4. Разработаны рекомендации по проектированию АДКО.

Методология и методы исследования, проводимые в работе, основаны на численном моделировании электрических машин с применением таких компьютерных программ как ELCUT и ANSYS, а также испытаниях электрических машин согласно ГОСТ 7217-87 и ГОСТ 11828-86.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ расчета электромагнитного момента синхронной машины с кольцевыми обмотками в программе ANSYS;
2. Справедливость принципа формирования многополюсного переменного магнитного поля в электрической машине с кольцевыми обмотками при общей магнитной системе для всех фаз;
3. Возможность создания вращающегося поля заданной полюсности при минимально возможном числе катушек, равном $2m$;
4. Способ, отличный от патента РФ 2121207, уменьшения величин максимальных электромагнитных моментов высших гармоник путем формирования магнитной системы АДКО;
5. Рекомендации по проектированию АДКО.

Степень достоверности и апробация результатов. Расчеты, проведенные с помощью пакетов ELCUT и ANSYS, были проведены в лицензированных копиях продуктов. Точность используемых методик работы в данных пакетах подтверждена совпадением результатов расчета методом конечных элементов с известными примерами расчета классических электрических машин. Оборудование, используемое в ходе экспериментов, было поверено соответствующими службами. Испытания АДКО проводились согласно ГОСТ 7217-87 и ГОСТ 11828-86.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 8 конференциях: XII Международная научно-техническая конференция «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», 2013 (Севастополь, 2013), Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», 2014 (Екатеринбург, 2014), Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», 2015 (Екатеринбург, 2015), IX Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2015), 2015 (Новосибирск, 2015), Международная научно-техническая конференция Пром-Инжиниринг-2016, 2016, ICIEAM-2016 (Челябинск, 2016), Первая научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института, 2016 (Екатеринбург, 2016), Вторая научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института, 2017 (Екатеринбург, 2017), 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 (Санкт-Петербург, 2017).

Личный вклад. Автором выполнено теоретическое исследование поставленных задач, проведены численные эксперименты на основе разработанного автором способа численного расчета электромагнитного момента синхронных электрических машин в программе ANSYS. Также автором проведены разработка, проектирование, контроль изготовления и

испытания экспериментального образца АДКО. Концептуальные аспекты и результаты работы обсуждались с научным руководителем.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 4 рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и вошедших в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, а также в 8 публикациях в сборниках материалов и тезисов докладов конференций, подана заявка на патент.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и пяти приложений. Работа изложена на 180 страницах, включая 145 рисунков и 30 таблиц. Список использованной литературы включает 39 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность проведенных в рамках диссертационной работы исследований, проведено рассмотрение конструкций, в которых может применяться обмотка с катушками кольцевого типа, формулируется цель работы, ставятся задачи исследования, излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена анализу принципов формирования перемещающегося периодического разноименнополюсного магнитного поля в электрических машинах переменного тока и описанию используемого в работе принципа формирования магнитной системы якоря с кольцевыми обмотками. В рамках проводимого исследования выделены два принципа формирования такого магнитного поля.

Первый принцип относится к случаю, когда среда, в которой предполагается формирование магнитного поля, в магнитном отношении однородна. В этом случае формирование периодически изменяющегося разноименнополюсного магнитного поля производится с помощью проводников с периодическим чередованием направлений тока в рядом расположенных проводниках. Проводники со встречно направленным движением электронов соединяются в витки, катушки, катушечные группы, образуя фазу.

Второй принцип получения периодически изменяющегося относительно, например, воображаемой цилиндрической поверхности разноименнополюсного магнитного поля относится к случаю, когда среда, в которой предполагается формирование магнитного поля, в магнитном отношении неоднородна и удельная магнитная проницаемость в каждой точке рассматриваемой области задается.

В рассматриваемой области выделяются объемы, где удельная магнитная проницаемость равна единице (например, воздух), и объемы (магнитные массы), где удельная магнитная проницаемость больше единицы (например, электротехническая сталь).

Для электрических двигателей малой мощности, имеющих выпные обмотки, в патенте РФ 2121207 предложен принцип создания

перемещающегося вокруг оси вращения воображаемой цилиндрической поверхности разноименнополюсного магнитного поля путем размещения 2m катушек кольцевого типа и чередования геометрии магнитных масс различной конфигурации. Геометрические оси всех катушек кольцевого типа якорной трехфазной обмотки совпадают с осью вращения воображаемой поверхности, относительно которой создается вращающееся разноименнополюсное магнитное поле. Магнитные массы охватывают каждую из катушек и имеют различную конфигурацию.

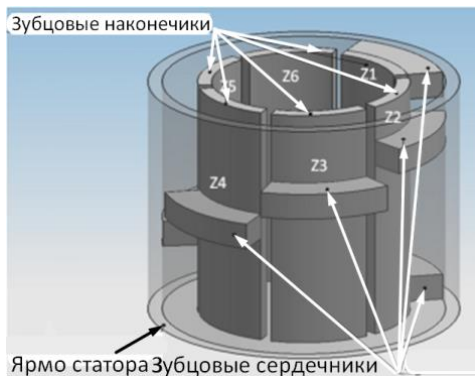


Рисунок 1 – Геометрические формы магнитных масс в пространстве и порядок их сопряжения при $p = 1$

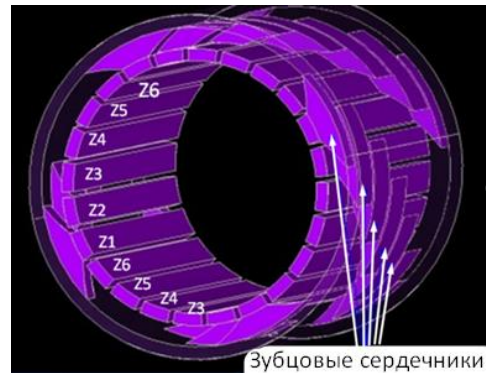


Рисунок 2 – Геометрические формы магнитных масс в пространстве и порядок их сопряжения при $p = 4$

На рисунках 1 и 2 показаны геометрические формы магнитных масс, размещение в пространстве и порядок их сопряжения для случая, когда число пар полюсов равно единице $p = 1$ и $p = 4$ при числе катушек, равном 6.

На рисунке 3 показано размещение катушек фаз кольцевого типа относительно магнитных масс. Схема соединений катушек кольцевого типа приведена на рисунке 4.

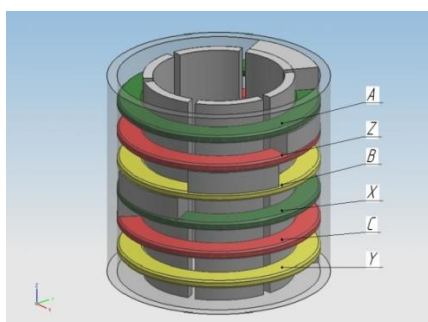


Рисунок 3 – Размещение катушек фаз кольцевого типа относительно магнитных масс

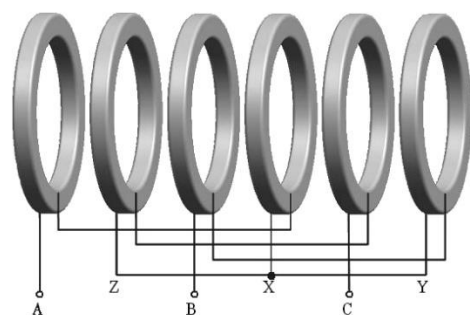


Рисунок 4 – Схема соединений катушек якорной обмотки статора

Для указанного случая и при любом числе пар полюсов минимальное число катушек трехфазной якорной обмотки с катушками кольцевого типа равно шести при построении шестидесятиградусной фазной зоны обмотки.

На рисунке 5 представлены вектора магнитного поля четырехполюсного асинхронного двигателя с числом пар полюсов $p = 2$ и числом пазов на полюс

и фазу q , равным единице: $q = 1$, для случая, когда якорная обмотка выполнена с кольцевыми обмотками и когда ток в фазе А равен току в фазе В и равен $\frac{1}{2}$ тока фазы С.

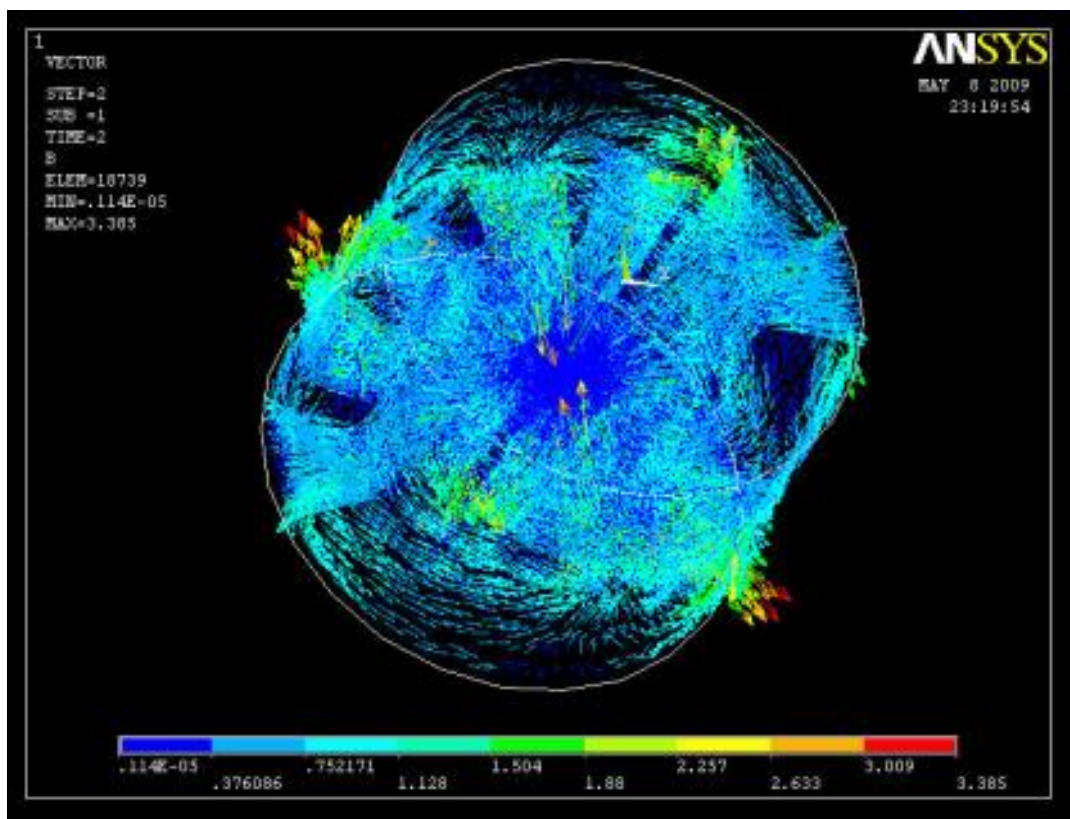


Рисунок 5 – Рассчитанное в пакете ANSYS распределение магнитного поля в ядре с кольцевыми обмотками

Как видно из рисунка 5, магнитное поле в статоре асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками в зоне яра статора и зубцовых сердечников имеет винтообразный характер вдоль оси вращения.

В распределении магнитного поля в машине с кольцевыми обмотками имеется ряд отличий в сравнении с классическими асинхронными машинами: магнитное поле в магнитной системе якоря с кольцевыми обмотками имеет не только радиальное (зубцовые сердечники), но и осевое (зубцовые наконечники) и смешанное (яро якоря) направление распределения. В связи с особенностями распределения поля в машине с кольцевыми обмотками, необходимо использовать трёхмерные модели для расчета магнитного поля якоря с кольцевыми обмотками выполненные, например, с помощью пакета ANSYS.

Во **второй** главе изложен способ расчета тангенциальной составляющей электромагнитной силы, действующей на полюс синхронной электрической машины, в среде ANSYS и проведен расчет синхронного двигателя с кольцевыми обмотками с использованием описанного способа с целью сравнения электромагнитного момента с синхронным двигателем классической конструкции на базе расчета тангенциальной составляющей силы, действующей на полюс.

При работе в программе ANSYS использовался режим статического анализа. Расчет зависимости электромагнитного момента синхронной машины от величины рабочего угла θ в явном виде требует для каждого значения рабочего угла перестраивать модель, меняя положение ротора, и заново проводить построение конечно-элементной сетки, что увеличивает время проведения расчетов. В связи с этим был разработан альтернативный способ имитации изменения нагрузки синхронной машины и угла θ путем изменения положения оси поля реакции якоря с помощью начальной фазы токов α .

Для расчета зависимости среднего значения тангенциальной составляющей электромагнитной силы, действующей на полюс, следует выполнить следующие действия:

- в катушке, которой присвоено имя A, задать значение тока как функцию угла α : $i_a = I_{\text{ном}} \times \sin(\alpha)$. За начальное значение угла α принять значение, равное нулю;
- токи в фазах B и C задать стандартным образом: $i_b = I_{\text{ном}} \times \sin(\alpha + 120)$, $i_c = I_{\text{ном}} \times \sin(\alpha - 120)$;
- провести расчет поля для каждого значения угла α .
- определить проекцию вектора силы, действующей между полюсом и статором, на перпендикуляр к оси симметрии каждого полюса.

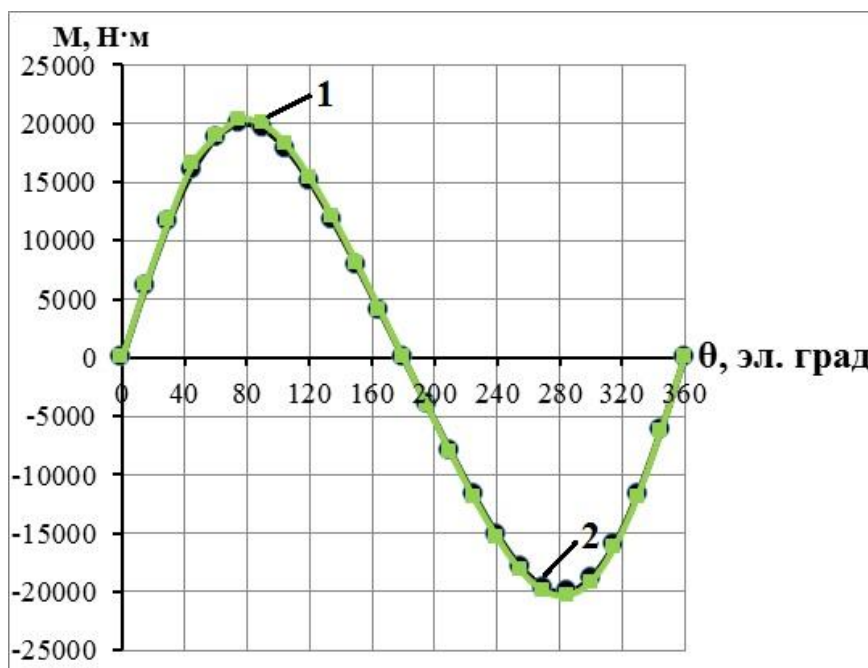


Рисунок 6 – Расчетные кривые электромагнитных моментов синхронного двигателя классического исполнения мощностью $P = 500$ кВт: 1 - электромагнитный момент, построенный по результатам расчета классической методикой; 2 – электромагнитный момент, построенный по результатам расчета с использованием пакета ANSYS;

С целью верификации представленного способа определения средней тангенциальной составляющей электромагнитной силы, действующей на

полюс, был проведен расчет синхронного двигателя мощностью 500 кВт общепромышленного применения. Данный двигатель был рассчитан по известной классической методике и в среде «ANSYS». На основании расчетов получены зависимости электромагнитного момента от угла θ (рисунок 6).

Из представленных на рисунке 6 результатов следует, что, расчет электромагнитного момента в среде «ANSYS» и расчет, проведенный по классической методике, отличаются не более чем на 5%. На этом основании можно утверждать, что разработанный способ определения электромагнитного момента обладает достаточной степенью точности для исследования синхронной машины с кольцевыми обмотками.

Способ создания перемещающегося магнитного поля в электрической машине с кольцевыми обмотками является новым и малоизученным. Для сравнения среднего значения тангенциальной составляющей электромагнитной силы синхронной электрической машины с кольцевыми обмотками и синхронной электрической машины классической конструкции в среде пакета «ANSYS» были рассчитаны конструкции синхронного двигателя с кольцевыми обмотками (СДКО) и классической синхронной машины (БГ-16) мощностью 16 кВт и частотой вращения 1500 об/мин. По результатам расчета получены зависимости средних значений тангенциальной составляющей электромагнитной силы, действующей на полюс ротора, от фазы тока статора (рисунок 7).

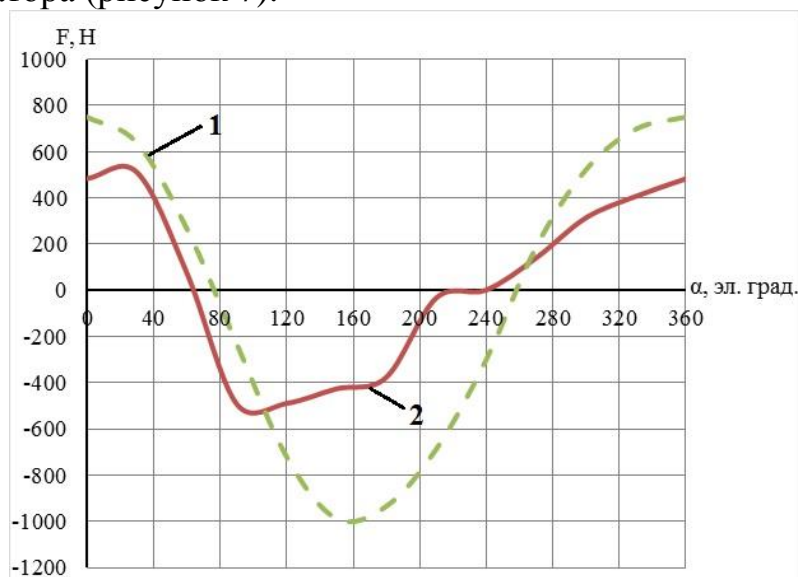


Рисунок 7 – Зависимости средних значений тангенциальных составляющих электромагнитных сил, действующих на полюсы БГ-16 (1) и СДКО (2) в функции фазы тока статора

По результатам расчета построено распределение индукции магнитного потока в магнитной системе СДКО с целью определения факторов, влияющих на среднее значение тангенциальной составляющей электромагнитной силы (рисунок 8).

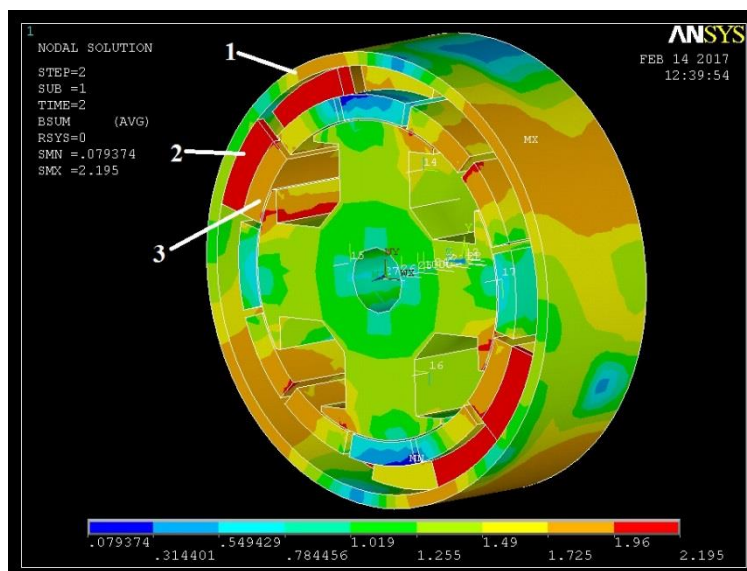


Рисунок 8 – Изометрическая зонная картина распределения индукции по участкам магнитной цепи якоря СДКО 1 – ярмо, 2 – зубцовый сердечник, 3 – зубцовый наконечник

Анализ полученного распределения индукции на основании зонной картины (рисунок 8) позволяет сделать вывод о том, что наиболее насыщенным участком магнитной цепи является зона зубцовых сердечников, индукция в которых имеет средний уровень 2 Тл.

Третья глава посвящена исследованию влияния геометрических размеров участков магнитной цепи и числа зубцовых наконечников на зубцовом сердечнике якоря с кольцевыми обмотками на тангенциальную составляющую электромагнитной силы синхронной, оценке удельного окружного усилия СДКО в сравнении с другими электрическими машинами и описанию конструкции экспериментального образца асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками.

С целью оценки влияния геометрических размеров участков магнитной цепи и электромагнитных нагрузок на величину максимальной электромагнитной силы, действующей на ротор, был выполнен ряд численных экспериментов в среде пакета программ «ANSYS» при постоянных геометрических и электромагнитных параметрах ротора.

Исследование влияния геометрических размеров участков магнитной цепи якоря СДКО на среднее значение тангенциальной составляющей электромагнитной силы проводилось в два этапа. На первом этапе при условии равенства осевой длины ротора и статора выполнялось:

- 1.1. Изменение высоты ярма статора;
- 1.2. Изменение высоты зубцового наконечника;
- 1.3. Изменение расстояния между зубцовыми наконечниками;
- 1.4. Изменение высоты зубцового сердечника;

На втором этапе проводилось исследование влияния увеличения длины якоря по отношению к длине ротора на величину максимальной тангенциальной составляющей электромагнитной силы.

По результатам исследования были разработаны рекомендации по выбору индукции по участкам магнитной цепи:

1. Среднее значение индукции в ярме якоря, зубцовом сердечнике и зубцовом наконечнике должны удовлетворять требованиям выбора индукции классических электрических машин;
2. Площадь сопряжения сердечника и ярма должна быть как минимум в два раза больше площади контакта наконечника и сердечника;

Выполненный с учетом данных рекомендаций расчет зависимости среднего значения тангенциальной составляющей электромагнитной силы, действующей на полюс, от фазы тока якоря показывает, что конструкция синхронного двигателя с кольцевыми обмотками способна обеспечить такое же значение данного параметра, что и классическая конструкция синхронной машины (рисунок 9). Осевая составляющая электромагнитной силы не превышает 5% от тангенциальной.

Характер кривой электромагнитного усилия якоря с кольцевыми обмотками свидетельствует о явном наличии электромагнитных моментов от высших гармоник поля в воздушном зазоре. В связи с этим была разработана и рассчитана конструкция с числом Q равным двум с соблюдением разработанных рекомендаций.

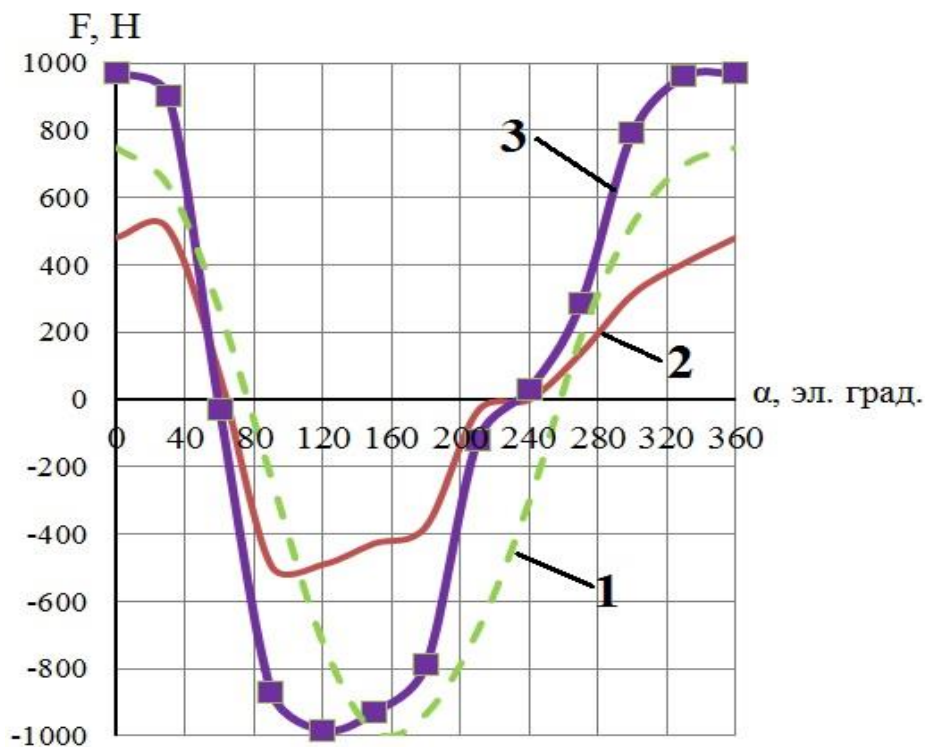


Рисунок 9 – Зависимость средней тангенциальной электромагнитной силы в функции фазы тока якоря синхронной машины классической конструкции БГ-16 (1), СДКО с исходной геометрией магнитной цепи якоря (2) и СДКО с измененной согласно рекомендациям магнитной системой (3)

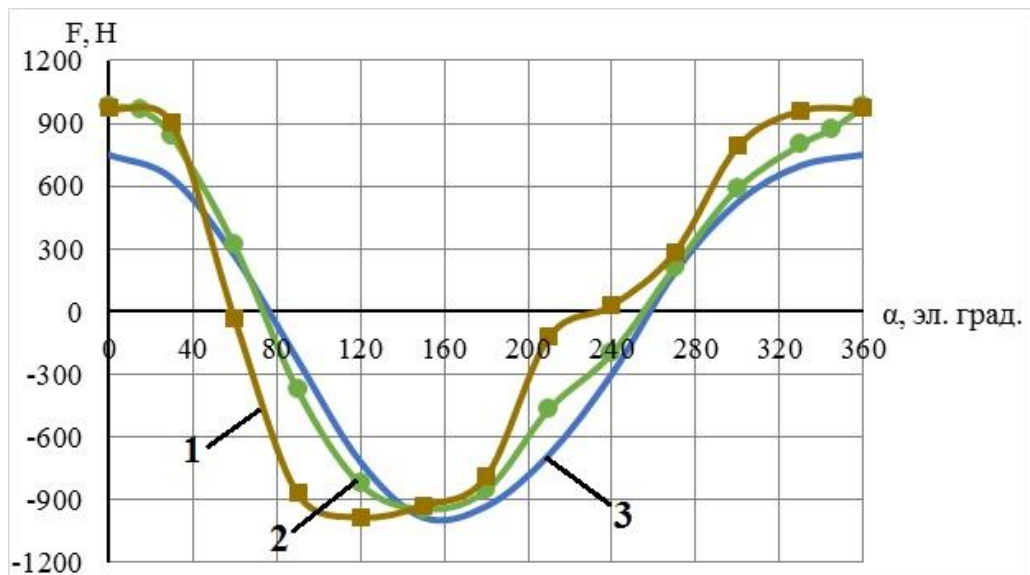


Рисунок 10 – Зависимость среднего электромагнитного усилия от фазы тока статора для конструкции якоря с кольцевыми обмотками при $Q = 1$ (1), при $Q = 2$ (2) и для классической конструкции якоря (3)

Расчет зависимости среднего электромагнитного усилия, действующего на полюс, от фазы тока якоря для конструкции якоря с кольцевыми обмотками с $Q = 2$ показывает, что влияние высших гармоник поля уменьшено, как и в машинах классической конструкции (рисунок 10).

Несмотря на близкие по значению максимальные электромагнитные усилия СДКО и классической синхронной машины, сравнение абсолютных показателей тангенциальной составляющей электромагнитной силы не позволяет оценить использование материалов СДКО. Оценку использования активных материалов обычно ведут с помощью удельного окружного усилия:

$$\sigma = \frac{F'}{\pi l_{\sigma} D} = \frac{M'}{\frac{D}{2} \pi l_{\sigma} D} = \frac{60}{\pi^2} \cdot \frac{P'}{l_{\sigma} D^2 n}, \text{ кН/м}^2(1), \text{ где}$$

F' – тангенциальная составляющая электромагнитной силы, действующей на ротор, кН;

M' – электромагнитный момент, действующий на ротор, кН·м;

P' – электромагнитная мощность электрической машины, кВт;

l_{δ} – длина воздушного зазора электрической машины, м;

D – внешний диаметр ротора, м;

n – частота вращения вала электрической машины.

Согласно (1) удельное окружное усилие синхронного двигателя с кольцевыми обмотками составляет:

$$\sigma_{\text{СДКО}} = \frac{F'}{\pi l_{\sigma} D} = \frac{0,983}{3,14 \times 0,105 \times 0,2326} = 12,83 \text{ кН/м}^2$$

Для проведения оценки удельного окружного усилия синхронной машины с кольцевыми обмотками в отношении других синхронных машин было рассчитано удельное окружное усилие ряда синхронных машин общепромышленного назначения различных мощностей и типов

возбуждения (рисунок 11). Синхронный двигатель с кольцевыми обмотками имеет схожее значение удельного окружного усилия.

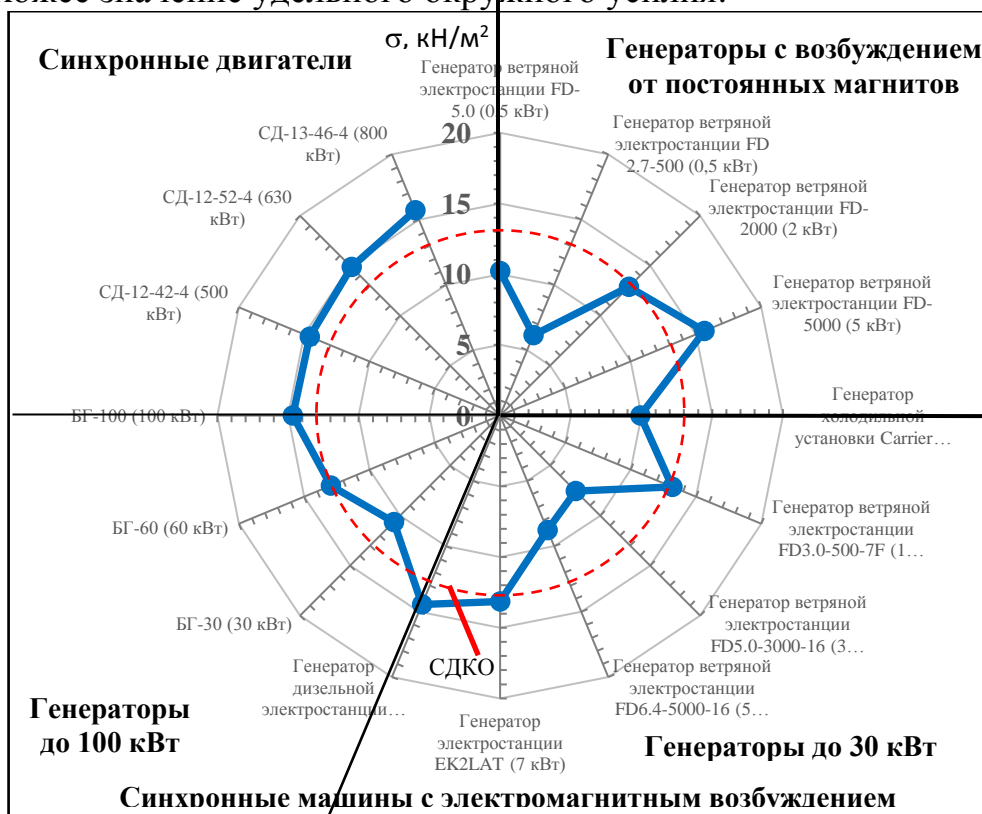


Рисунок 11 – Удельные окружные усилия синхронных машин

Наряду с расчетом окружных усилий был проведен расчет удельных окружных усилий асинхронных машин различных серий и мощностей как самых распространенных в промышленности (рисунок 12).

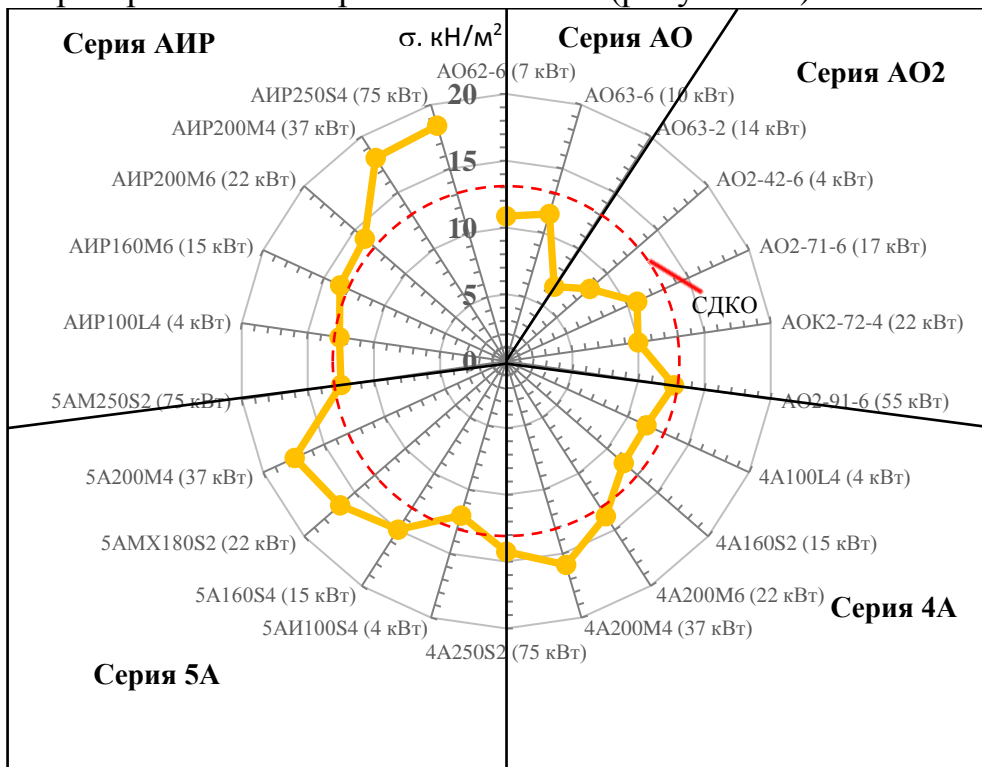


Рисунок 12 – Удельные окружные усилия асинхронных двигателей

Сравнение удельных окружных усилий синхронных и асинхронных машин свидетельствует о близких значениях данного параметра. Данный факт позволяет предположить, что применение разработанных рекомендаций по выбору индукции на участках магнитной цепи синхронного двигателя с кольцевыми обмотками к асинхронной машине с кольцевыми обмотками позволит получить сравнимое с классическими машинами удельное окружное усилие.

В качестве прототипа для изготовления экспериментального образца асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками был выбран двигатель ДМ112SA6 мощностью 2.2 кВт и напряжением 220/380 В.

С помощью пакета ANSYS согласно рекомендованным значениям индукции по участкам магнитной цепи были определены высота ярма статора, высота зубцового сердечника, ширина места сопряжения зубцового сердечника с ярмом и зубцовыми наконечниками, высота и ширина зубцового наконечника, высота и ширина катушки якоря и длина якоря. На основании полученных размеров было выполнено проектирование раскроя листов электротехнической стали и построена трехмерная модель магнитной системы экспериментального образца асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками с $Q = 2$.

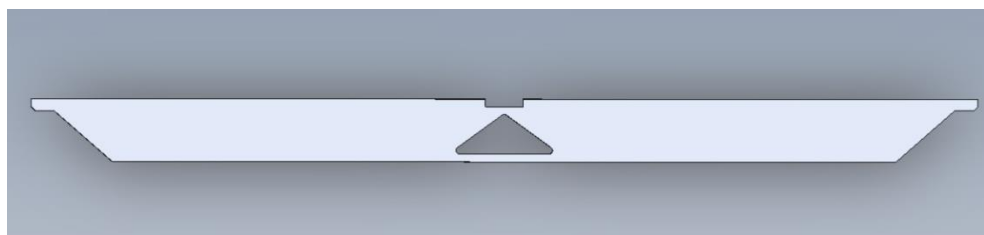


Рисунок 13 – Лист зубцового наконечника

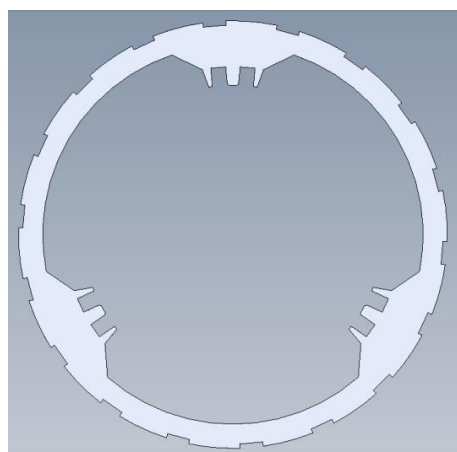


Рисунок 14 – Лист зубцового сердечника

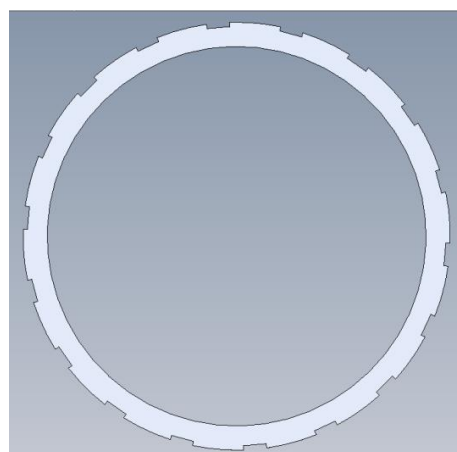


Рисунок 15 – Лист потокопроводящей вставки между зубцовыми сердечниками

Из листов, представленных на рисунках 13-15 собирается единая магнитная система статора. Крепление зубцовых наконечников в магнитной системе осуществляется с помощью внешних и внутренних опорных колец, размещающихся по обеим сторонам зубцовых наконечников. Крепление

магнитной системы осуществляется с помощью скоб, внутреннее опорное кольцо удерживается с помощью специальных шайб (рисунок 16).

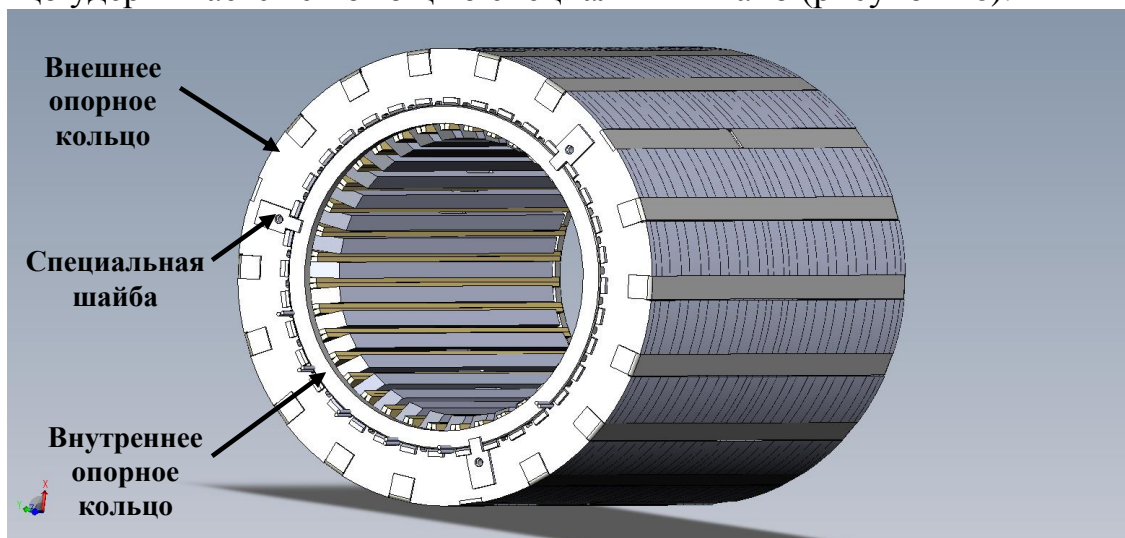


Рисунок 16 – Магнитная система якоря асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками в сборе

Одной из особенностей конструкции якоря с кольцевыми обмотками является наличие отъемных элементов, которыми являются зубцовые наконечники. В процессе работы асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками на зубцовые наконечники действуют радиальные электромагнитные силы, в связи с чем было проведено исследование распределения данных сил.

Четвертая глава посвящена определению радиальных электромагнитных сил, действующих на зубцовый наконечник в асинхронном двигателе с кольцевыми обмотками.

Известно, что в электрической машине на ротор и статор действуют одинаковые по значению, но различные по направлению тангенциальные и радиальные силы.

Конструктивной особенностью якоря с кольцевыми обмотками является наличие отъемных зубцовых наконечников, которые воспринимают усилия от взаимодействия статора и ротора. Удержание наконечников от перемещения по окружности вследствие действия тангенциальных усилий осуществляется укладкой наконечников в пазы, находящиеся в зубцовом сердечнике, и путем расклинивания зубцовых наконечников.

В радиальном направлении на наконечник будут действовать две силы притяжения: со стороны ротора и со стороны зубцового сердечника. Точки приложения сил притяжения между сердечником и наконечником для каждого зубцового наконечника определяются положением зубцового сердечника в пространстве.

Таким образом, на удерживающие зубцовые наконечники кольца будут действовать переменные силы, в зависимости от взаимного положения зубцового наконечника и зубцового сердечника. В связи с этим направление и величина результирующих сил, действующих на каждый зубцовый наконечник, определено с помощью пакета ELCUT (рисунок 17).

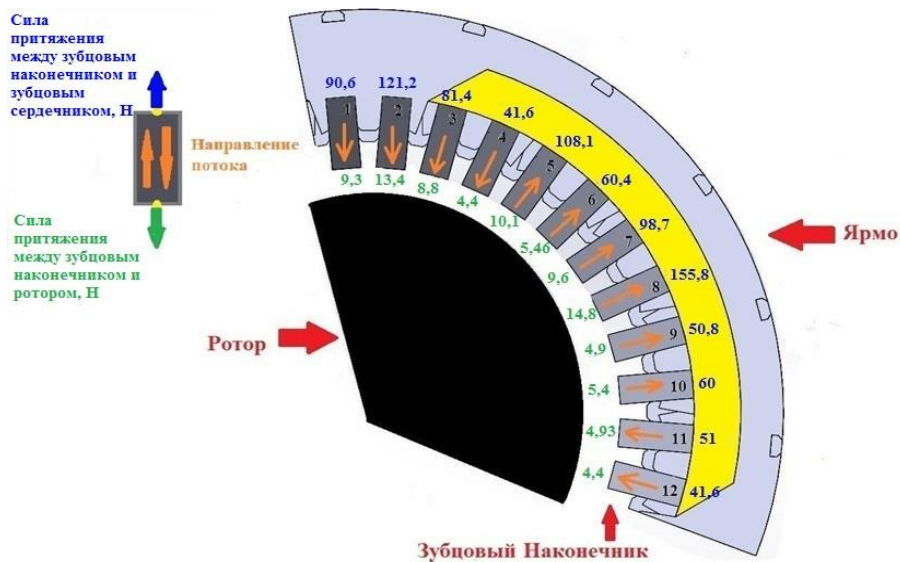


Рисунок 17 – Распределение сил, действующих на наконечник для полной конструкции машины

Анализ распределения сил показывает, что для каждого наконечника сила, притягивающая его к сердечнику, значительно превышает силу, притягивающую его к ротору. Это означает, что на внутреннее опорное кольцо в процессе работы не действуют сжимающие его силы. Следовательно, внутреннее опорное кольцо носит функцию исключительно технологического назначения: удержание зубцовых наконечников от выпадения при отсутствии магнитного поля в статоре.

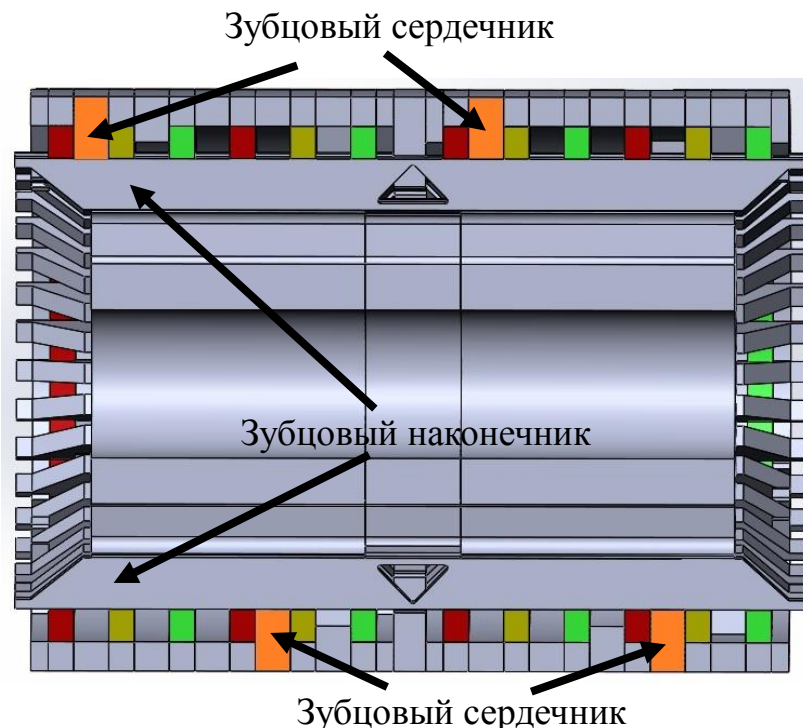


Рисунок 18 – Конструкция якоря с $Q = 2$

Внешние опорные кольца разгружены от внешних усилий благодаря двум зубцовым сердечникам, прилегающим к каждому зубцовому наконечнику (рисунок 18) и воспринимающим силы притяжения зубцового наконечника к зубцовому сердечнику. Таким образом, внутреннее и внешнее

опорные кольца несут технологическую функцию удержания зубцовых наконечников при отсутствии поля в якоре АДКО.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию экспериментального образца асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками. В главе приводятся экспериментально полученные зависимости фазного напряжения в функции фазного тока для режимов холостого хода и короткого замыкания. Также приведена экспериментально полученная механическая характеристика асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками, схемы замещения асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками и результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальный образец асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками был изготовлен совместно с ЗАО «Уралэлектромаш» в габаритных размерах двигателя ДМ112SA6 (рисунки 19 и 20).



Рисунок 19 – Впрессованный в станину статор АДКО



Рисунок 20 – АДКО в сборе

Испытания АДКО преследовали ряд целей:

- 1) подтвердить или опровергнуть справедливость нетрадиционного принципа формирования периодически изменяющегося разноименнополюсного магнитного поля в машинах малой мощности переменного тока при использовании в якорной трехфазной обмотке катушек кольцевого типа; изложенный в главе 1;
- 2) подтвердить или опровергнуть справедливость принципа организации числа пар полюсов;
- 3) подтвердить или опровергнуть справедливость возможности: при минимально возможном числе катушек обмотки статора, равном шести и числе фаз $m = 3$ получить число пар полюсов, равное трем;
- 4) подтвердить или опровергнуть возможность изменения направления вращения путем изменения чередования числа фаз при подключении обмотки статора к сети;
- 5) подтвердить или опровергнуть справедливость возможности подавления нечетных гармоник в кривой магнитного поля в зазоре.

Испытания проводились на лабораторной установке, изображенной на рисунках 21 и 22.

Испытания экспериментального образца асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками проводились по стандартной программе, и включали в себя:

1. Опыт по определению направления вращения и реверс АДКО;
2. Опыт холостого хода;
3. Опыт короткого замыкания;
4. Получение механической характеристики;
5. Определение индуктивного сопротивления рассеяния с удалённым ротором.



Рисунок 21 – Общий вид лабораторного стенда для испытаний АДКО



Рисунок 22 – Установленный в машинный ряд для испытаний АДКО

По результатам проведенных испытаний получены экспериментальные зависимости напряжения холостого хода и короткого замыкания от тока фазы статора и механическая характеристика АДКО (рисунки 23–25).

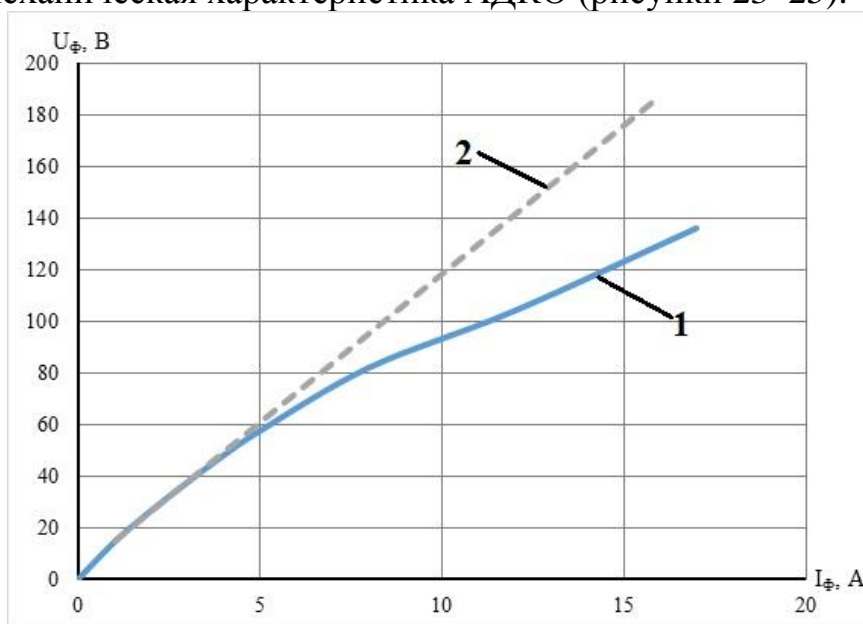


Рисунок 23 – Экспериментальная зависимость напряжения холостого хода (1) и экстраполированная линейная часть кривой напряжения холостого хода (2) в функции тока холостого хода

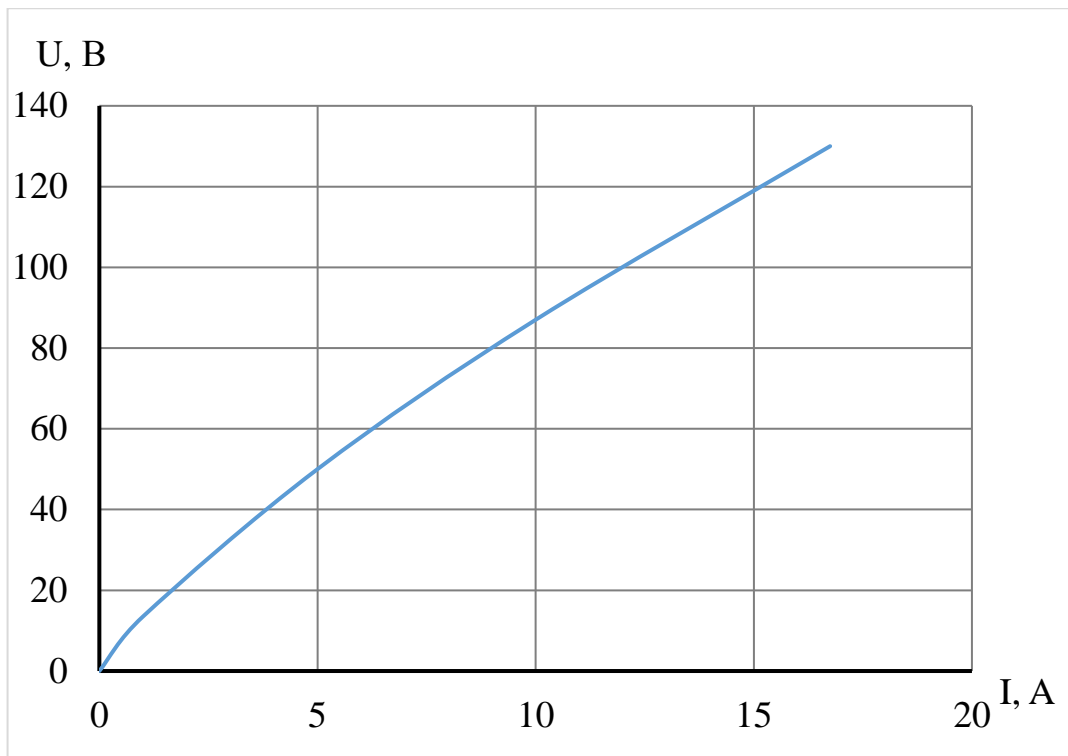


Рисунок 24 – Экспериментальная зависимость изменения напряжения короткого замыкания в функции тока короткого замыкания для фазы А

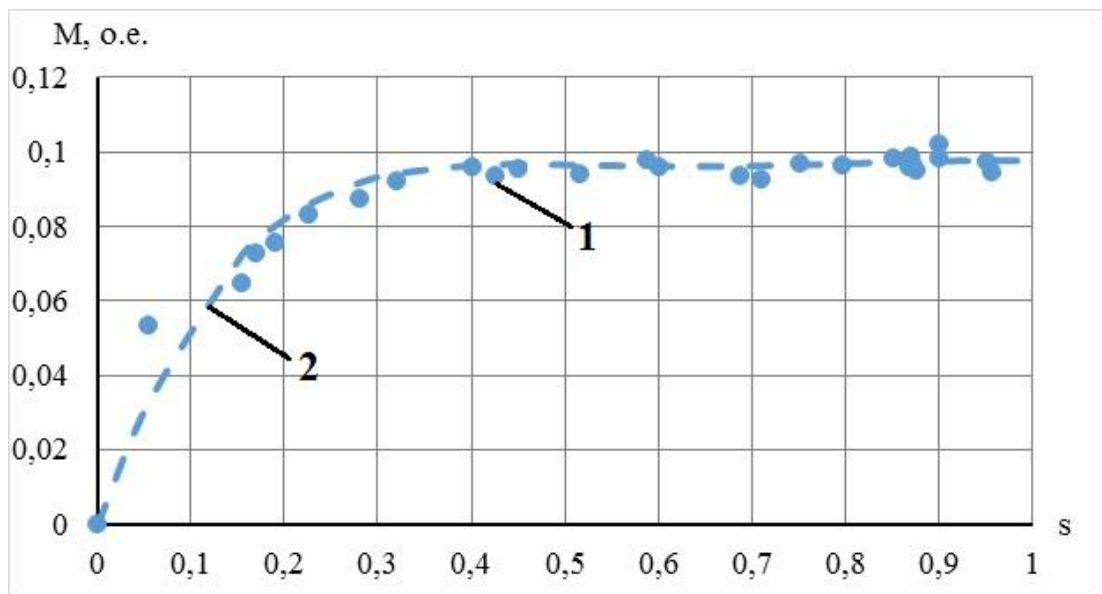


Рисунок 25 – Экспериментальная механическая характеристика (1) и аппроксимированная полиномом пятой степени механическая характеристика (2) АДКО

На основании опытов короткого замыкания, холостого хода и опыта по определению индуктивного сопротивления рассеяния были рассчитаны параметры схемы замещения АДКО.

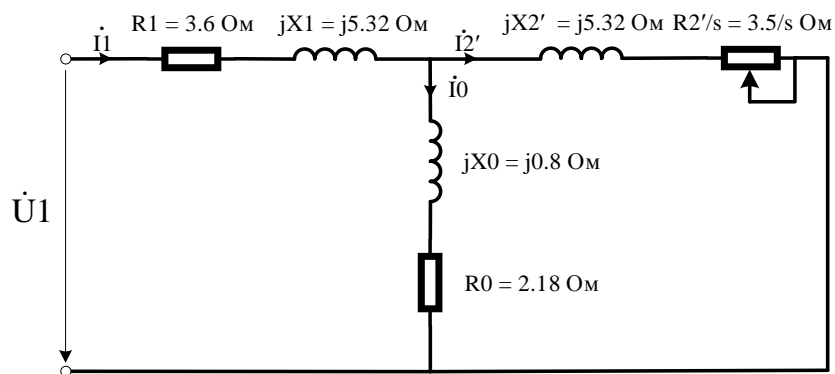


Рисунок 26 – Схема замещения АДКО для насыщенного режима с параметрами в абсолютных величинах

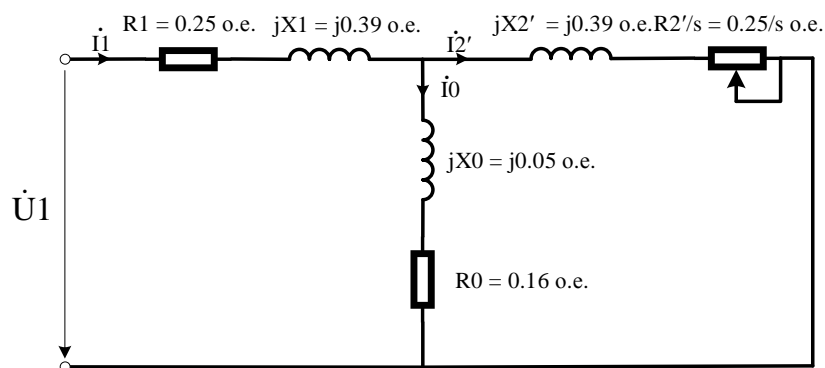


Рисунок 27 – Схема замещения АДКО для насыщенного режима с параметрами в относительных величинах

За базисное сопротивление принимается сопротивление, определяемое через номинальное напряжение и номинальный ток двигателя ДМ112SA6.

На основании проведенных экспериментальных исследований получены следующие результаты:

1. В ходе испытаний подтверждена справедливость нетрадиционного принципа формирования периодически изменяющегося разноименнополюсного магнитного поля в машинах малой мощности переменного тока при использовании в якорной трехфазной обмотке катушек кольцевого типа. Данный тезис подтверждается наличием вращения вала АДКО при подключении его статорной обмотки к трехфазной сети переменного напряжения.
2. Расчетное число пар полюсов АДКО было принято равным 3. В результате опыта по определению частоты вращения вала на холостом ходу АДКО данная величина составила 972 об/мин, что подтверждает справедливость принципа формирования числа пар полюсов.
3. Экспериментально подтверждена возможность создания магнитного поля с числом пар полюсов, равным 3, при числе катушек, равном 6.
4. В ходе опыта обратного вращения частота вращения вала составила 969 об/мин.
5. В механической характеристике (рисунок 25) нет видимого «провала» электромагнитного момента АДКО при частоте вращения 1/7 от номинальной частоты вращения, что говорит о подавлении моментов от

нечетных гармонических составляющих магнитного поля в воздушном зазоре.

6. Анализ полученных данных позволяет сделать рекомендации по проектированию АДКО:

6.1. Для увеличения индуктивного сопротивления взаимной индукции между статорными и роторными контурами выполнить магнитопроводящие вставки из листов электротехнической стали в ярме статора для каждой половины якоря АДКО.

6.2. Расчеты, выполненные в пакете ANSYS, показывают, что требуется выполнять магнитную систему типа АДКО на большей высоте оси вращения относительно классической конструкции магнитной системы той же мощности.

В заключении приведены основные результаты работы:

На основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Разработана математическая модель и способ определения электромагнитного момента синхронной электрической машины в пакете «ANSYS» для магнитостатического режима работы.

2. С помощью разработанной методики определения электромагнитного момента проведено исследование магнитной системы якоря синхронного двигателя с кольцевыми обмотками в пакете «ANSYS» и определены рекомендуемые значения индукции по участкам магнитной цепи.

3. С помощью пакета «Elcut» проведена оценка величины радиальных составляющих электромагнитной силы, действующей на зубцовый наконечник якоря. В результате оценки было установлено, что силы взаимодействия между зубцовым сердечником и зубцовым наконечником превышают силы взаимодействия между ротором и зубцовым наконечником.

4. Впервые разработан на кафедре «Электрические машины», изготовлен на ЗАО «Уралэлектромаш» и испытан в условиях лаборатории кафедры «Электрические машины» экспериментальный образец асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками. По итогам испытаний получены результаты:

4.1. Подтверждена справедливость нетрадиционного принципа формирования периодически изменяющегося разноименнополюсного магнитного поля в машинах малой мощности переменного тока при использовании в якорной трехфазной обмотке катушек кольцевого типа.

4.2. Доказана справедливость принципа формирования числа пар полюсов. При расчетном числе пар полюсов, равном 3, частота вращения вала АДКО на холостом ходу составляет 972 об/мин.

4.3. В ходе пуска АДКО на холостом ходу экспериментально подтверждена возможность создания магнитного поля с числом пар полюсов, равным 3, при числе катушек, равном 6.

- 4.4. Подтверждена возможность изменения направления вращения вала АДКО посредством изменения чередования фаз.
- 4.5. Экспериментально полученная механическая характеристика АДКО подтверждает подавление моментов от высших нечетных гармонических составляющих магнитного поля в воздушном зазоре.
5. Разработаны рекомендации по проектированию АДКО.

Основные публикации по теме работы

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

1. **Malygin I.V., Plastun A.T.** Synchronous motor with ring windings electromagnetic torque calculation algorithm with Ansys package usage [Электронный ресурс] // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911487, 2017 IEEE (индексирована в Scopus и Web Of Science)
2. **Tikhonova O., Malygin I., Plastun A.** The modeling and the calculation of the subexciter with permanent magnets by dint of “ANSYS Maxwell” [Электронный ресурс] // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911630, 2017 IEEE (индексирована в Scopus и Web Of Science) 0,462 п.л. / 0,23 п.л.
3. **Tikhonova O., Malygin I., Plastun A.** Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by “ANSYS Maxwell [Электронный ресурс] // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 16-19 May 2017, DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076294, 2017 IEEE (индексирована в Scopus и Web Of Science) 0,5775 п.л. / 0,28 п.л.
4. **Plastun A.T., Tikhonova O.V., Malygin I.V.** Non-conventional rule of making a periodically varying different-pole magnetic field in low-power alternating current electrical machines with using ring coils in multiphase armature winding [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 313, Issue 1, 19 February 2018, DOI: 10.1088/1757-899X/313/1/012002 (индексирована в Scopus и Web Of Science) 1,04 п.л. / 0,5 п.л.

Другие публикации:

5. **Малыгин И.В.** Удельная тангенциальная составляющая усилия электромагнитного поля в рабочем зазоре синхронного двигателя с кольцевыми обмотками [Текст] / И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 258-261. 0,462 п.л. / 0,462 п.л., авторство не разделено
6. **Тихонова О.В.** Особенности моделирования асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками в программном пакете «ANSYS Maxwell»

- [Текст] / О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, С.Л. Кулаков // Наука. Техника. Инновации.: сб. науч. тр. / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2015. – С. 66-68. 0,288 п.л. / 0,09 п.л.
7. **Тихонова О.В.** Моделирование и расчет подвозбудителя с постоянными магнитами в среде «ANSYS Maxwell» [Текст] / О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Пром-Инжиниринг.: труды II международной научно-технической конференции. / ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), Издательский центр ЮУрГУ. – Челябинск, 2016. – С. 376-380. 0,5775 п.л. / 0,28 п.л.
 8. **Берая Р.К.** Анализ целесообразности использования пакета ANSYS Maxwell RMXprt при курсовом проектировании асинхронного двигателя студентами направления «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электромеханика» квалификацией «Бакалавр» [Текст] / Р.К. Берая, О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2016. – С. 222-225. 0,462 п.л./ 0,154 п.л.
 9. **Берая Р.К.** Изучение влияния демпферной обмотки на работу синхронной машины в несимметричных режимах в программном пакете «ANSYS Maxwell» [Текст] / Р.К. Берая, О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2016. – С. 222-225. 0,5775 п.л. / 0,19 п.л.
 10. **Соколов Н.В.** Использование и анализ применения пакета ANSYS при курсовом проектировании синхронного двигателя студентами направления «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электромеханика» квалификацией «Бакалавр» [Текст] / Н.В. Соколов, О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2016. – С. 231-234. 0,462 п.л. / 0,154 п.л.
 11. **Тихонова О.В.** Некоторые особенности применения пакета «ANSYS Maxwell» для расчета электрических машин [Текст] / О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2015. – С. 228-230. 0,231 п.л. / 0,1 п.л.
 12. **Тихонова О.В.** Расчет индуктивностей обмоток статора в асинхронном двигателе с кольцевыми обмотками с помощью пакетов «ANSYS» и

«ANSYS Maxwell» [Текст] / О.В. Тихонова, И.В. Малыгин, А.Т. Пластун // Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2017. – С. 260-264. 0,52 п.л. / 0,2 п.л.