

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



Тихонова Ольга Валерьевна

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ
С ДВУХСТАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ
И КОЛЬЦЕВЫМИ ОБМОТКАМИ**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» на кафедре «Электротехника» Уральского энергетического института.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, **Пластун Анатолий Трофимович**

Официальные оппоненты: **Казаков Юрий Борисович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина», профессор кафедры «Электромеханика»;

Ганджа Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, профессор кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика»;

Мошкин Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», заведующий кафедрой «Цифровая энергетика»

Защита состоится «11» апреля 2024 г. в 16-00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.09.23 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 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»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=5738>.

Автореферат разослан « ____ » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хальясмаа
Александра Ильмаровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Увеличение производства объемов атомной энергии вызывает рост количества ядерных отходов, требующих утилизации.

Технология переработки радиоактивного топлива представляет собой процесс, происходящий в специальной радиационно-защитной камере, где одной из главных составных частей перерабатывающих устройств являются асинхронные двигатели малой и средней мощности, работающие в условиях высокой температуры и радиации.

В процессе работы в тяжелых условиях происходит активное разрушение органической изоляции обмоток электродвигателей, что приводит к сокращению срока их службы. По данным, изложенным в открытых источниках, срок службы асинхронных двигателей с органической изоляцией обмоток статора, работающих в условиях повышенной радиации, не превышает 5 месяцев.

Двигатели малой мощности с поврежденной от воздействия радиации изоляцией обмоток статора не подлежат ремонту и требуют замены на резервные двигатели. Частая замена двигателей требует вложения денежных средств, связанных с остановкой технологического процесса и непосредственной заменой двигателя, а также серьезных затрат человеческих ресурсов, поскольку замена двигателей не автоматизирована.

Увеличение срока службы асинхронных двигателей с 5 месяцев до 2-3 лет может быть достигнуто посредством применения керамической изоляции для обмоток статора. Однако, как известно, керамический тип изоляции обладает малой механической прочностью при деформации на изгиб при укладке витков катушки в полузакрытый паз, что делает невозможным использование катушки статора в форме «лодочки», повсеместно применяемой в существующей конструкции магнитной системы статора асинхронных двигателей малой и средней мощности.

Для эффективного использования неорганических изоляционных материалов требуется нетрадиционная конструкция сердечника статора асинхронного двигателя малой мощности, позволяющая производить укладку готовых катушек, не прибегая к их деформации при сборке, как это делается в двигателях общепромышленного применения. В данном случае необходимо использовать катушки статора наиболее простой геометрической

формы, например, кольцевого типа, при этом оси катушек совпадают друг с другом и с осью вращения ротора.

Степень разработанности темы исследования

Применение катушек кольцевого типа для обмоток асинхронных двигателей широко известно и описано, например, В. А. Дартау и А. И. Переваловым.

Данные изобретения отличаются от асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (далее – АДКО) тем, что вращающееся магнитное поле в них создается с помощью сдвинутых в пространстве катушек, в то время как вращающееся магнитное поле АДКО создается с помощью специальным образом организованной магнитной системы.

Разработкой конструкции двигателей с поперечным магнитным потоком и катушками кольцевого типа занимались Гиерас Я. Ф., Розман Г. И., Шэфер У., Архутич Д. П., Свиридов Г. М., Сеньков А. П., Yongming X. Представленные изобретения отличаются от конструкции АДКО тем, что для каждой фазы необходимо спроектировать собственную магнитную систему, в то время как АДКО имеет единую магнитную систему для всех m фаз обмотки статора.

Проектированием двигателей с асимметричным магнитопроводом, в которых возможно применение обмоток с керамической изоляцией, также занимаются специалисты кафедры «Электротехника» УрФУ. Основные вопросы, связанные с особенностями расчета и анализа данных конструкций, отражены в работах Пластуна А. Т., Денисенко В. И., Малыгина И. В., Бакубаева Б. Т., Сметанина В. В.

Исследование неорганических изоляционных материалов в условиях высокой температуры и радиации, показавшее эффективность их применения при работе в тяжелых условиях, описано в трудах Дубровского В. Б., Ильина А. Н., Недзельского В. Е., Петрова В. В., Шавнева А. А., Юферова Ю. В., Бекетова А. Р. и его учеников.

Магнитная система статора АДКО, которая делает возможным применение готовых недеформируемых при укладке катушек с керамической изоляцией, также была разработана на кафедре «Электротехника» УрФУ и описана в патенте РФ 2121207.

Первый опытный образец двигателя типа АДКО был спроектирован сотрудниками кафедры «Электротехника» УрФУ

совместно с ЗАО «Уралэлектромаш» на базе серийного двигателя общепромышленного применения типа АО2-32-6, имеющего высоту оси вращения $h=112$ мм и число пар полюсов $p=3$.

Проведенные испытания первого опытного образца АДКО показали, что метод создания перемещающегося относительно ротора магнитного поля с помощью специальным образом размещенных в пространстве магнитных масс справедлив, но значение максимального момента двигателя типа АДКО оказалось гораздо меньше, чем двигателя общепромышленного применения АО2-32-6, имеющего те же габариты. Полученные результаты испытаний вызывают необходимость проведения специальных исследований, связанных с поиском факторов, оказывающих влияние на значение максимального момента двигателя, с целью совершенствования конструкции магнитной системы АДКО.

Объектом исследования является конструкция электромагнитного ядра опытных образцов двигателя типа АДКО, **предметом исследования** – факторы, оказывающие влияние на максимальный момент двигателя типа АДКО.

Целью исследования является повышение максимального электромагнитного момента асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками путем совершенствования конструкции двигателя и применения уточненных цифровых моделей.

Для выполнения исследовательской цели в работе ставятся следующие **задачи**:

1) разработать расчетно-цифровые модели, учитывающие влияние вихревых токов, насыщения стали, изоляционной оксидной пленки листов сердечника статора, для первого и второго опытных образцов АДКО в прикладном программном пакете «ANSYS Maxwell»;

2) используя цифровую модель первого опытного образца АДКО, провести анализ магнитного поля в воздушном зазоре двигателя и проверить справедливость принципа создания симметричного относительно ротора вращающегося магнитного поля;

3) используя цифровую модель первого опытного образца АДКО, провести анализ картины распределения магнитного потока по участкам магнитной цепи, определив коэффициент насыщения магнитной цепи и коэффициент рассеяния магнитного потока;

4) с помощью цифровой расчетной модели первого опытного образца АДКО в статическом режиме расчета определить индуктивные сопротивления рассеяния и взаимоиндукции и построить схему замещения двигателя с учетом осевого сдвига в пространстве его статоров;

5) с помощью цифровых расчетных моделей первого и второго опытных образцов АДКО в динамическом режиме расчета определить механические характеристики, характеристики холостого хода и короткого замыкания двигателей, сравнив полученные результаты с данными испытаний;

6) разработать способы увеличения максимального электромагнитного момента двигателя типа АДКО путем внесения изменений в существующую конструкцию ядра и проверить эффективность предложенных методов на расчетно-цифровых моделях АДКО.

Научная новизна исследования связана со следующими полученными результатами:

1) разработаны цифровые модели первого и второго опытных образцов двигателя типа АДКО, **отличающиеся** возможностью поэтапного учета факторов, влияющих на максимальный момент двигателя (вихревых токов, изоляционной оксидной пленки листов сердечника статора, насыщения магнитной цепи), в статических и динамических режимах работы двигателя;

2) разработана и построена схема замещения двигателя типа АДКО, **отличающаяся от известных тем**, что в ней учтены конструктивные особенности электромагнитного ядра: двухстаторная магнитная система, статоры которой сдвинуты друг относительно друга на угол $30/p$ геометрических градусов;

3) на основании цифрового моделирования **выявлена закономерность** изменения главных размеров (внутреннего диаметра статора D и длины магнитопровода l_δ) двигателя типа АДКО при переходе конструкции на большую высоту оси вращения, **отличающаяся** от общепромышленных машин линейной, а не квадратичной зависимостью;

4) **выявлена закономерность** распределения линий магнитного поля в магнитной системе АДКО, **отличающаяся** от классической картины тем, что для линий, огибающих катушку в ярме статора, магнитная проницаемость должна иметь максимальное значение;

5) в случае деления статора на две половины для увеличения рабочего потока **выявлена закономерность**, заключающаяся в том, что число зубцовых наконечников в двигателе типа АДКО должно быть минимально возможным.

Теоретическая значимость работы отражается в методике электромагнитного расчета двигателя АДКО, представляющей симбиоз классических методов и метода конечных элементов (МКЭ), а также в получении результатов, которые были использованы в процессе проектирования второго опытного образца АДКО.

Практическая значимость работы отражена в использовании результатов работы при проектировании электромагнитного ядра второго опытного образца двигателя типа АДКО совместно с ЗАО «Уралэлектромаш» г. Каменск-Уральский.

Методология и методы исследования заключаются в построении и последующем анализе 3D-моделей двигателя типа АДКО с помощью программных пакетов, позволяющих осуществлять анализ объемной модели с применением МКЭ. Для определения механических характеристик двигателя дополнительно к МКЭ использовались традиционные аналитические методики расчета асинхронных машин

Положения, выносимые на защиту:

- особенности построения цифровых расчетных моделей первого и второго опытных образцов двигателя типа АДКО;
- особенности электромагнитного расчета двигателя типа АДКО в статическом и динамическом режимах с использованием МКЭ;
- анализ конструктивных изменений двигателя типа АДКО с целью увеличения максимального момента двигателя с помощью цифровых расчетных моделей;
- результаты проведенных исследований.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по следующим пунктам:

п.1) Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и **компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем**, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

п.2) **Разработка научных основ проектирования**, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов.

п.4) Исследование **работоспособности** и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные результаты работы обсуждались и докладывались на всероссийских и международных конференциях:

– «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», г. Екатеринбург, 2018г.;

– Научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института, г. Екатеринбург, 2017 г.;

– Международная научно-техническая конференция «IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus)», г. Санкт-Петербург, 2017 г., 2018 г, 2022 г.;

– Международная конференция «International Conference on Actual Problem of Electromechanics and Electrotechnology (APEET)», г. Екатеринбург, 2017 г., 2019 г.;

– Международная научно-техническая конференция «International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)», г. Москва, 2018 г.

По теме диссертационного исследования опубликовано **20** научных работ, из них **10** статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе **8** статей, вошедших в международную базу цитирования Scopus; **1** патент РФ, полученный совместно с ЗАО «Уралэлектромаш», г. Каменск-Уральский.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений. Работа изложена на 297 страницах, из них 253 страницы основного текста, список литературы содержит 90 наименований различных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 начинается с описания особенностей конструкции якоря асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (АДКО).

Первый опытный образец двигателя типа АДКО состоит из двух последовательно соединенных машин, статоры которых сдвинуты друг относительно друга на угол $30/p$ геометрических градусов вокруг оси вращения ротора (рис. 1).

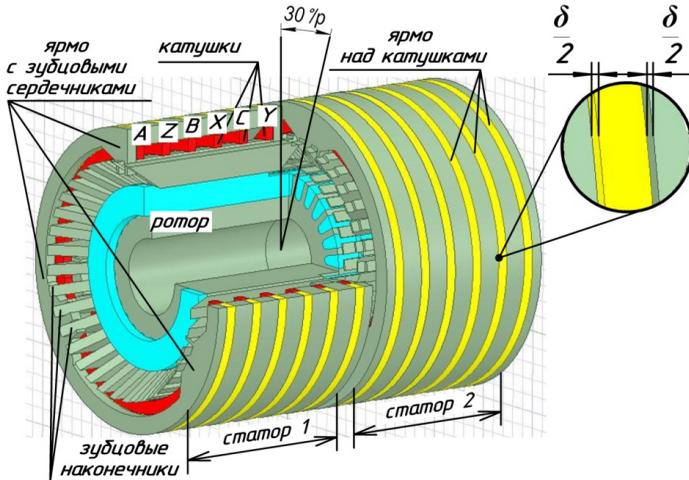


Рисунок 1 – Цифровая модель первого опытного образца АДКО с двумя статорами

Согласно патенту РФ 2121207 каждый статор двигателя, входящий в каскад, для числа полюсов $2p=6$ состоит из 18 зубцовых наконечников Z_N , расположенных вокруг оси вращения, при этом каждый зубцовый наконечник по дуге расщеплен на две части, поэтому общее число зубцовых наконечников АДКО для $p=3$ равняется 36. Каждой паре полюсов принадлежит 7 зубцовых сердечников Z_S .

Каждый последующий сердечник сдвигается относительно предыдущего вдоль зубцового наконечника на расстояние, равное осевой длине катушки, и поворачивается вокруг оси вращения на угол $360/Z_N$ геометрических градусов. В каждом зубцовом сердечнике вырезаны пазы для размещения зубцовых наконечников, каждому зубцовому сердечнику принадлежит одна пара зубцовых наконечников (рис. 2). Катушки якорной обмотки АДКО имеют концентрическую форму и расположены между зубцовыми сердечниками таким образом, что между соседними зубцовыми сердечниками расположена одна катушка одной из фаз (рис. 3).

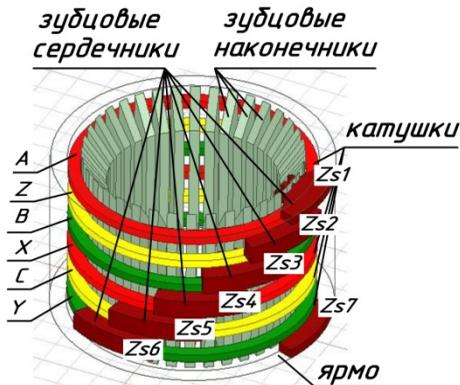


Рисунок 2 – Зубцовые сердечники и зубцовые наконечники одного из статоров первого опытного образца

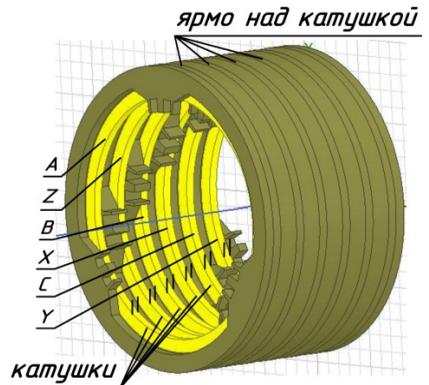


Рисунок 3 – Расположение зубцовых сердечников и катушек одного из статоров первого опытного образца АДКО

Оси всех катушек обмотки статора совпадают между собой. Каждая половина АДКО для числа пар полюсов $p=3$ состоит из шести катушек, при этом фазе *A* принадлежат катушки *A* и *X*, фазе *B* – катушки *B* и *Y*, фазе *C* – катушки *C* и *Z*. Каждой фазе обмотки статора АДКО для числа пар полюсов $p=3$ принадлежит 4 катушки, соединенные последовательно встречно; 12 катушек обмотки статора соединяются по схеме «звезда». Над катушками располагаются стальные кольца, образующие ядро над катушками, оси колец совпадают между собой и осями катушек статора (рис. 1, рис. 3). Ротор АДКО – классический короткозамкнутый, сердечники роторов объединены общей короткозамыкающей клеткой, выполненной из алюминия (рис. 1).

Сердечники статора и ротора выполняются из шихтованной электротехнической стали марки Э 2211, стальные листы 7-8 изолируются слоем оксидной пленки 5-6, образуя так называемую «слоистую» структуру (рис. 4). Способ организации вращающегося магнитного поля, предложенный в патенте РФ 2121207, предполагает наличие осевой (участок 1-2; 3-9) и радиальной (участок 3-4; 9-10) составляющей магнитного потока (рис. 4). Из-за «слоистой» структуры статора магнитное сопротивление для осевой составляющей магнитного поля много больше, чем для радиальной составляющей, т.к. между стальными листами присутствуют

дополнительные воздушные зазоры, вызванные опрессовкой сердечников на стадии изготовления и наличием оксидной пленки стальных листов.

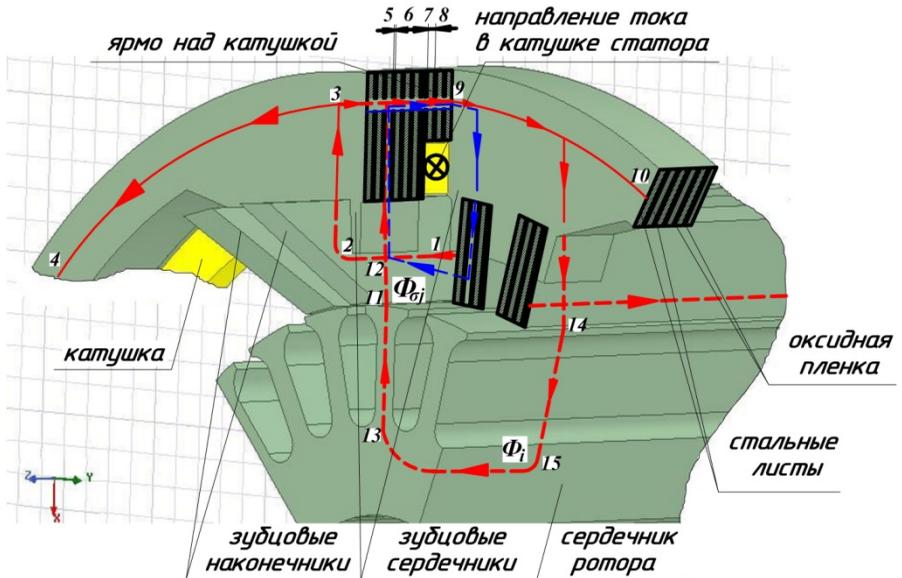


Рисунок 4 – Контур потока взаимоиндукции Φ_i (1-2-3-9-10-14-15-13-11-12) и потока рассеяния $\Phi_{\sigma j}$ (синий контур) на участке магнитной цепи АДКО

Учет наличия между листами ярма статора дополнительного зазора, вызванного наличием оксидной пленки листов сердечника статора, а также степенью опрессовки сердечника статора, проводится путем введения в модель дополнительных сосредоточенных зазоров δ над катушкой (рис. 1). Толщина каждого воздушного зазора эквивалентна толщине оксидной пленки на расчетном участке магнитной цепи. На расчетном участке магнитной цепи 3-9, представленном на рис. 4, толщина оксидной пленки составляет $\delta=1,33$ мм.

На начальном этапе исследования факторов, влияющих на максимальный момент, пользователем рассматривалось поле в воздушном зазоре отдельно взятого статора двигателя из каскада с гладким ротором для **трех случаев** состояния магнитной цепи:

Случай 1. Магнитная проницаемость магнитных масс приближается к бесконечности $\mu_{ст} \leq \infty$, а коэффициент заполнения магнитной системы сталью $K_{з,с}$ принимается равным 1;

Случай 2. Магнитная проницаемость электротехнической стали принимается в соответствии с характеристикой намагничивания стали марки Э 2211, коэффициент заполнения магнитной системы сталью $K_{з,с}$ принимается равным 1;

Случай 3. Проводится учет насыщения стали и оксидной пленки листов сердечника статора.

Исследования, проведенные в **главе 1**, показали, что принцип формирования магнитного поля, предложенный в патенте РФ 2121207, справедлив, распределение магнитной индукции в воздушном зазоре такое же, как в классической машине.

На втором этапе исследования, описанном в **главе 2**, проводится численная оценка потоков рассеяния и основного магнитного потока. Коэффициент рассеяния магнитного потока определяется следующим соотношением:

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma\phi}}{\Phi_{\delta\phi}} \quad (1)$$

В выражении (1) $\Phi_{\sigma\phi}$ – поток рассеяния на одну фазу, Вб; $\Phi_{\delta\phi}$ – основной магнитный поток на одну фазу, Вб.

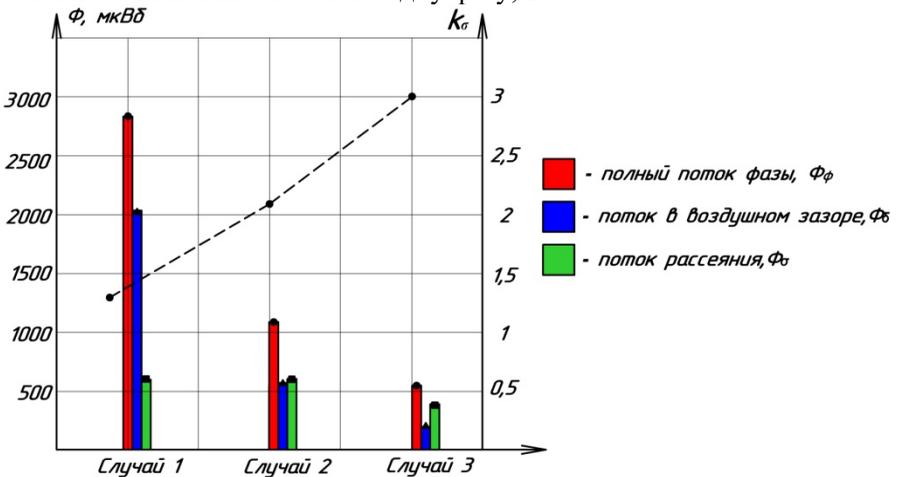


Рисунок 5 – Соотношение магнитных потоков и коэффициент рассеяния первого опытного образца АДКО при трехфазном питании статора для случаев 1-3

В ходе анализа, представленного в **главе 2**, проводились расчеты полного потока фазы Φ_{ϕ} , потока в воздушном зазоре Φ_{δ} , полного потока рассеяния Φ_{σ} и коэффициента рассеяния k_{σ} для

Случаев 1-3, так же, как и в **главе 1**. Результаты расчета представлены на рис. 5 при трехфазном питании обмотки статора для тока фазы $I=5$ А.

Опираясь на результаты расчетов первого опытного образца АДКО, представленные в **главе 2** и показанные на рис. 5, можно сделать следующие выводы:

1) для **случая 1** поток в воздушном зазоре Φ_δ составляет около 83 % от общего потока Φ_m , для **случая 2** поток в воздушном зазоре Φ_δ равен примерно 50 % от общего потока;

2) анализ **случая 3** показывает, что общий магнитный поток Φ_m уменьшается примерно в 5 раз по сравнению с первым режимом расчета, при этом поток рассеяния Φ_σ в два раза больше потока в воздушном зазоре Φ_δ ;

3) наибольшее влияние на рабочий поток в машине оказывают дополнительные воздушные зазоры между листами сердечника статора, уменьшающие осевую составляющую магнитного потока.

4) анализ модели, наиболее приближенной к опытному образцу (**случай 3**), показал, что поток рассеяния Φ_σ составляет примерно 67 % общего магнитного потока фазы Φ_ϕ .

Исследования, приведенные в **главе 3**, посвящены оценке эффективности применения шунтирующих магнитных вставок в ярме сердечника статора первого опытного образца АДКО.

Шунтирующие магнитные вставки применяются с целью уменьшения магнитного сопротивления для осевой составляющей рабочего магнитного потока, для чего в ярме статора с наружной стороны нарезаются 18 пазов шириной 14 мм и высотой 5 мм. Магнитные шунты набираются из отдельных листов электротехнической стали марки Э 2211 толщиной 0,5 мм и укладываются в пазы. При этом листы при укладке ориентируются вдоль оси вращения машины. Длина магнитного шунта определяется длиной одного сердечника статора АДКО, входящего в каскад (рис. 6).

Оценка эффективности применения магнитного шунтирования для осевой составляющей магнитного потока на первом этапе проводилась с помощью статического расчета индуктивных сопротивлений (табл. 1); на втором – с помощью статического расчета потокосцепления воздушного зазора (рис. 7).

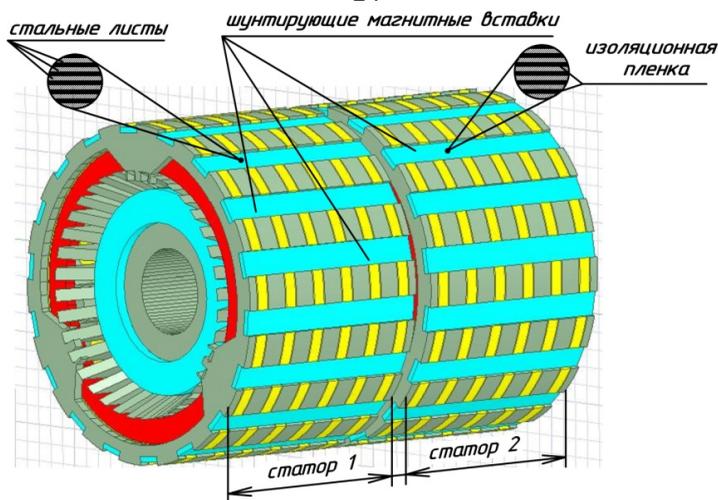


Рисунок 6 – Цифровая модель первого опытного образца АДКО с шунтирующими магнитными вставками

Таблица 1 – Индуктивные сопротивления АДКО для ненасыщенного и насыщенного режимов при трехфазном питании обмотки статора (опытный образец №1)

С учетом дополнительных зазоров и без учета магнитных вставок		С учетом магнитных вставок и дополнительных зазоров	
Ненасыщенный режим ($I=1$ А)	Насыщенный режим ($I=5$ А)	Ненасыщенный режим ($I=1$ А)	Насыщенный режим ($I=5$ А)
$X_l=5,8$ Ом	$X_l=5,52$ Ом	$X_l=9,32$ Ом	$X_l=8,8$ Ом
$X_m=4$ Ом	$X_m=2,8$ Ом	$X_m=18,8$ Ом	$X_m=6,9$ Ом

Исследования, проведенные в главе 3 в статическом режиме, показали, что:

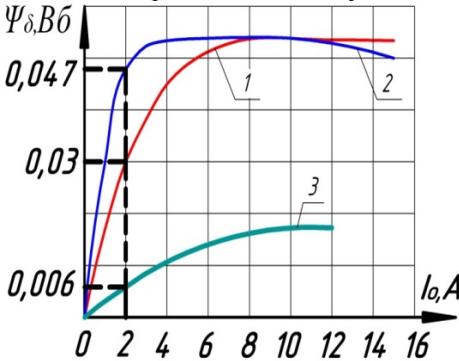
1) индуктивное сопротивление рассеяния X_l цифровой модели первого опытного образца АДКО превышает взаимное индуктивное сопротивление X_m в два раза;

2) применение шунтирующих магнитных вставок в яре статора позволяет увеличить взаимное индуктивное сопротивление в 4,7 раза;

3) организация в яре статора АДКО дополнительного пути для осевого магнитного потока с помощью магнитных шунтов

позволяет увеличить магнитный поток в зазоре практически в 1,6 раза на линейной части характеристики холостого хода;

4) вихревые токи, учитываемые в характеристике намагничивания 3 (рис. 7), уменьшают потокоцепление в воздушном зазоре в пять раз по сравнению с цифровой моделью АДКО, где влияние вихревых токов не учитывается.



На рис. 7:

- 1 – расчет с учетом дополнительных зазоров;
- 2 – расчет с учетом дополнительных зазоров и магнитных шунтов;
- 3 – результаты эксперимента (с учетом вихревых токов)

Рисунок 7 – Магнитные характеристики первого опытного образца АДКО

В главе 4 описывается процесс построения схемы замещения АДКО, цифровая модель которого представлена на рис. 1. Сдвиг одного статора относительно другого осуществляется с целью уменьшения амплитуды пятой и седьмой гармоник ЭДС в роторе.

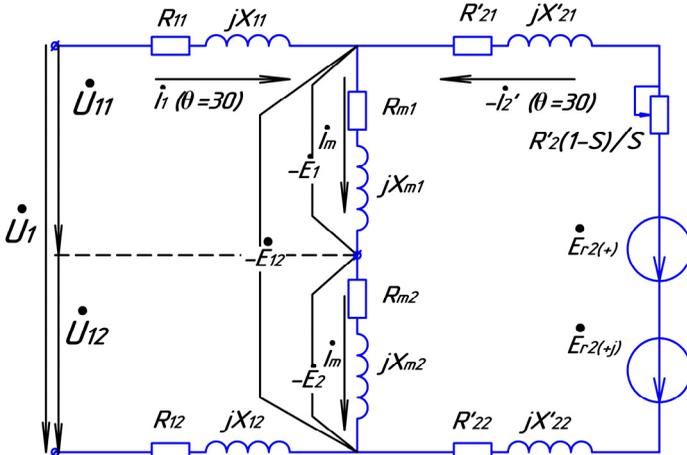


Рисунок 8 – Схема замещения АДКО с двумя роторами и двумя статорами, сдвинутыми в пространстве

Пространственный сдвиг одного статора относительно другого вокруг оси вращения на $30/p$ геометрических градусов осуществляется с помощью введения во вторичную цепь двух дополнительных ЭДС: $\Delta \dot{E}_{r2(+)}=0,067$ В и $\Delta \dot{E}_{r2(+j)}=+j0,258$ В (рис. 8).

В главе 5 проводится анализ цифровых моделей **первого и второго** опытных образцов АДКО в динамическом режиме при питании обмотки статора от синусоидального напряжения. **Первый и второй** опытные образцы АДКО выполнены в одних и тех же габаритах, имеют высоту оси вращения $h=112$ мм и **отличаются** друг от друга:

- 1) высотой зубцового наконечника: в первом образце она составляет величину $h_{нак1}=16,5$ мм, во втором – $h_{нак2}=11$ мм;
- 2) числом витков в катушке статора: для первого образца $W_1=44$, для второго – $W_2=70$;
- 3) наличием шунтирующих магнитных вставок: в первом опытном образце шунтирующих вставок нет (рис. 1), во втором опытном образце шунтирующие магнитные вставки имеются (рис. 6).

Динамические расчеты цифровых моделей **первого и второго опытных образцов АДКО** проводились с учетом следующих допущений (Д1-Д3):

Д1) без учета вихревых токов в листах сердечника статора и дополнительных зазоров в сердечнике статора;

Д2) с учетом дополнительных зазоров в сердечнике статора и вихревых токов в листах сердечника статора;

Д3) с учетом дополнительных зазоров в сердечнике статора, вихревых токов в листах сердечника статора и шунтирующих магнитных вставок в ярме статора.

Динамический расчет выполнялся с целью получения для **первого и второго** опытных образцов АДКО характеристик холостого хода $U_o=f(I_o)$ (рис. 9, а); короткого замыкания $U_k=f(I_k)$ (рис. 9, б), механических характеристик при $U=127$ В (рис. 10-11). Расчетные характеристики сравнивались с результатами испытаний двигателей типа АДКО.

Наличие изоляционной оксидной пленки листов сердечника статора эквивалентно увеличению воздушного зазора, поэтому ток холостого хода **первого опытного образца АДКО** в 5 раз превышает значение тока холостого хода в двигателе общепромышленного применения. Кроме того, **первый опытный образец АДКО** не имеет вентиляционных лопаток на роторе и внутреннего вентилятора для

обдува обмоток, что в совокупности вызывает неконтролируемый нагрев обмоток статора и ротора.

Учет влияния температурного режима при расчете кривых момента проводится посредством постепенного увеличения активного сопротивления статора и ротора, что приводит к сдвигу механической характеристики в сторону больших скольжений. Кривая 5 (рис. 11) соответствует расчетной температуре ротора 600 °С, что говорит о существенном влиянии на форму кривой не только активных сопротивлений, но и вихревых токов, вызванных наличием осевой составляющей магнитного потока.

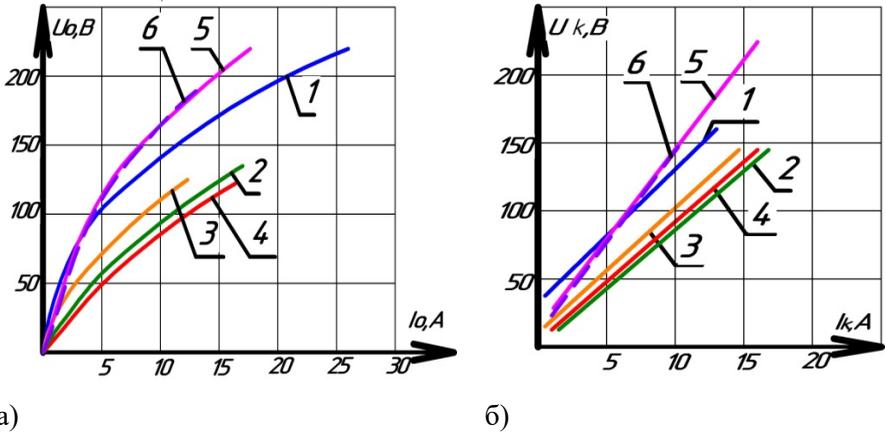


Рисунок 9 – Характеристика двигателя типа АДКО:

а) холостого хода; б) короткого замыкания

- 1 – расчетная, для цифровой модели образца АДКО № 1, с учетом Д1;
- 2 – расчетная, для цифровой модели образца АДКО № 1, с учетом Д2;
- 3 – расчетная, для цифровой модели образца АДКО № 1, с учетом Д3;
- 4 – экспериментальная, для образца АДКО № 1, полученная в результате испытаний;
- 5 – расчетная, для цифровой модели образца АДКО № 2, с учетом Д3;
- 6 – экспериментальная, для опытного образца АДКО № 2, полученная в результате испытаний

В главе 5 рассматривается переход АДКО на большую высоту оси вращения для увеличения максимального момента. Как известно, для двигателей общепромышленного применения изменение высоты оси вращения справедливо при постоянстве объема электромагнитного ядра: $L_{\delta} \cdot D_{\text{ром}}^2 = \text{const}$.

В двигателе типа АДКО уменьшение осевой длины ротора L_δ не может происходить пропорционально квадрату внешнего диаметра D_{rot} , т.к. возникает проблема размещения катушек статора. Критерием постоянства при переходе цифровых моделей двигателя типа АДКО на другую высоту оси вращения в главе 5 было принято соотношение $L_\delta \tau = const$, где τ – полюсное деление двигателя типа АДКО по внешнему диаметру ротора. Переход двигателя на высоту оси вращения $h=180$ мм с $h=112$ мм позволяет увеличить максимальный момент двигателя типа АДКО в 1,8 раза.

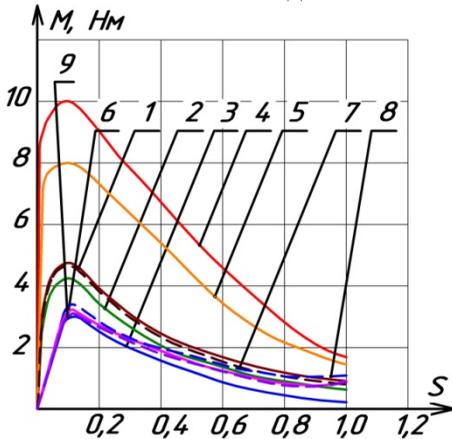


Рисунок 10 – Расчетные механические характеристики АДКО:

опытный образец АДКО № 1 ($h=112$ мм, $t=75$ °C): 1 – с учетом Д1; 2 – с учетом Д2; 3 – с учетом Д3; 7 – полученная с помощью схемы замещения;

модель АДКО ($h=180$ мм, $t=75$ °C): 4 – с учетом Д1; 5 – с учетом Д3;

опытный образец АДКО № 2 ($h=112$ мм, $t=75$ °C):

6 – с учетом Д2; 8 – с помощью схемы замещения; 9 – полученная в результате испытаний

Для увеличения взаимного индуктивного сопротивления

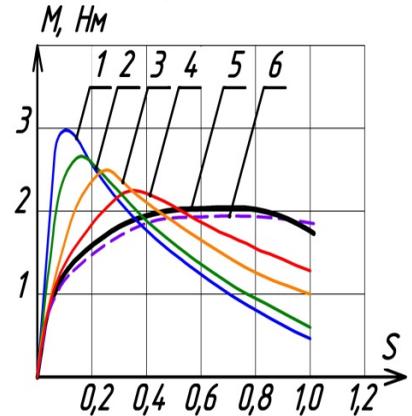


Рисунок 11 – Механические характеристики опытного образца АДКО № 1 (1-5 – расчетные; 6 – эксперимент):

1 – при расчетной температуре 75 °C;

2 – при увеличении активного сопротивления в 1,4 раза;

3 – при увеличении активного сопротивления в 2,4 раза;

4 – при увеличении активного сопротивления в 3,9 раза;

5 – при увеличении активного сопротивления в 6 раз;

6 – результат эксперимента

индуктивного сопротивления в цифровой модели АДКО с высотой оси вращения $h=180$ мм между

двумя соседними зубцовыми наконечниками, принадлежащими общему зубцовому сердечнику, размещается короткий зубцовый наконечник, в длину равный одной половине статора АДКО (рис. 13). Статор двигателя типа АДКО состоит из отдельных модулей, которые возможно изготовить из разных магнитных материалов: короткие и длинные зубцовые наконечники можно набрать из листов анизотропной стали, например, марки Э 3411, при этом направление стального проката листа будет ориентировано вдоль оси вращения ротора АДКО.

Расчетные механические характеристики цифровой модели АДКО с высотой оси вращения $h=180$ мм, с применением коротких зубцовых наконечников, магнитного шунтирования, стали марки Э 3411 и питающем фазном напряжении $U=220$ В представлены на рис. 10 (кривые 4 и 5).

Исследования, проведенные в **главе 5**, показали, что полученные с помощью цифровых моделей результаты динамического расчета механических характеристик, характеристик холостого хода и короткого замыкания с учетом вихревых токов и «слоистой» структуры сердечника статора с ошибкой менее 6 % отличны от результатов испытаний первого и второго опытных образцов АДКО, что подтверждает их справедливость.

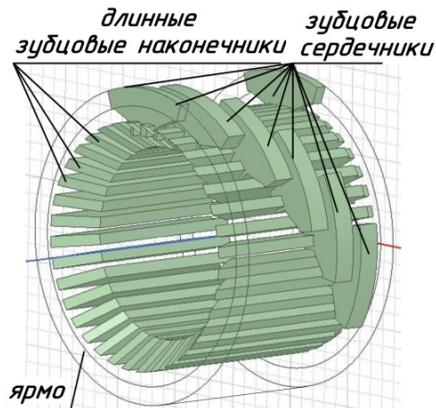


Рисунок 12 – Длинные зубцовые наконечники первого и второго опытных образцов АДКО ($h=112$ мм)

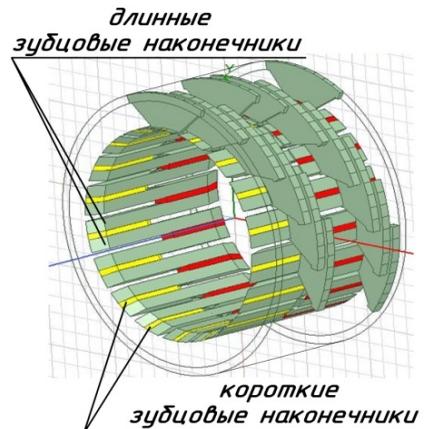


Рисунок 13 – Длинные и короткие зубцовые наконечники цифровой модели АДКО ($h=180$ мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основываясь на проведенных в работе исследованиях цифровых моделей двигателя типа АДКО, можно заключить следующее:

1. Разработаны цифровые расчетные модели первого и второго опытных образцов АДКО с учетом изоляционной оксидной пленки листов сердечника статора, вихревых токов и насыщения стали, позволяющие проводить анализ процессов, происходящих в реальном двигателе.

2. Анализ построенных цифровых моделей АДКО показал, что принцип создания магнитного поля, описанный в патенте РФ 2121207, справедлив, в магнитном соотношении двигатель АДКО симметричен по фазам и ведет себя так же, как и двигатель общепромышленного применения.

3. Статический анализ картины распределения магнитного потока по участкам магнитной цепи в цифровой расчетной модели первого опытного образца АДКО показал, что магнитный поток рассеяния Φ_{σ} превышает поток в воздушном зазоре Φ_{δ} в два раза. Коэффициенты насыщения магнитной цепи при питании каждой отдельно взятой фазы обмотки статора отличаются друг от друга с ошибкой менее 5 %.

4. При построении схемы замещения двигателя типа АДКО с двухстаторной магнитной системой сдвиг одного статора относительно другого на $30/p$ геометрических градусов вокруг оси вращения учитывается посредством введения во вторичную цепь двух дополнительных ЭДС.

5. Расчет индуктивных сопротивлений в статическом режиме показал, что для опытного образца АДКО № 1 индуктивное сопротивление рассеяния X_{σ} превышает взаимное индуктивное сопротивление X_m в два раза.

6. Полученные в динамическом режиме с помощью цифровых расчетных моделей двигателя типа АДКО механические характеристики, характеристики холостого хода и короткого замыкания отличаются от опытных данных менее чем на 5 %, что говорит о справедливости построенных моделей.

7. Динамический расчет цифровой модели первого опытного образца АДКО показал, что применение шунтирующих магнитных вставок в ярме сердечника статора увеличивает максимальный момент

АДКО в 1,4 раза. Ток холостого хода I_0 уменьшается при этом в 1,3 раза.

8. Динамический расчет цифровой модели второго опытного образца АДКО показал, что максимальный момент увеличился в 1,7 раза, ток холостого хода уменьшился в 2,5 раза по сравнению с опытным образцом АДКО № 1.

9. Динамический анализ цифровых моделей АДКО с переходом на большую высоту оси вращения h при условии постоянства площади полюсного деления $L_\delta \tau = const$ показал, что максимальный момент двигателя увеличивается в 1,875 раза при $h=180$ мм.

10. Применение в цифровой модели АДКО при $h=180$ мм шунтирующих магнитных вставок, коротких зубцовых наконечников, анизотропной стали для зубцовых наконечников, а также уменьшение высоты зубцового наконечника в два раза увеличивает максимальный электромагнитный момент АДКО в 4 раза, уменьшает ток холостого хода в 5 раз по сравнению с первым опытным образцом АДКО.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Tikhonova, O.** The modeling and the calculation of the subexciter with permanent magnets by dint of «ANSYS Maxwell» / O. Tikhonova, I. Malygin, A. Plastun // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, 7911630, 0,462 п. л. / 0,23 п. л. (Scopus)

2. **Tikhonova, O.** Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by «ANSYS Maxwell» / O. Tikhonova, I. Malygin, A. Plastun // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), St. Petersburg, Russia, 16-19 May 2017, 8076294, 0,5775 п. л. / 0,28 п. л. (Scopus)

3. **Tikhonova, O.** Electromagnetic Torque Calculation of Induction Motor with Ring Windings by dint of «ANSYS Maxwell» / O. Tikhonova, A. Plastun // 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRus), St. Petersburg, Russia, 1-3 February 2017, pp. 1600-1605, 0,42 п. л. / 0,21 п. л. (Scopus)

4. Plastun, A. 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 / A. Plastun, **O. Tikhonova**, I. Malygin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 313, Issue 1, 012002, 19 February 2018, 1,04 п. л. / 0,5 п. л. (Scopus)

5. **Tikhonova, O.** Electromagnetic Calculation of Induction Motor by «ANSYS Maxwell» / O. Tikhonova, A. Plastun // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Russia, 29 January-1 February 2018, pp. 822-826 0,3п. л. / 0,15 п. л. (Scopus)

6. **Tikhonova, O.** Calculation of Inductive Resistances of Induction Motor with Ring Windings by «ANSYS Maxwell» / O. Tikhonova, I. Malygin, A. Plastun // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia, 15-18 May, 2018, 8728767, 0,33 п. л. / 0,165 п. л. (Scopus).

7. **Tikhonova, O.** The methodology of MMF calculation in magnetic circuit of induction motor by «ANSYS Maxwell» / O. Tikhonova, D. Mineeva, A. Plastun // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 950. – Iss. 1. – 012032, 0,3п. л. / 0,1 п. л.(Scopus)

8. **Тихонова, О. В.** Исследование влияния слоистой структуры якоря асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками на распределение магнитного потока / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, А. Т. Пластун // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40. – С. 5 – 26, 0,9 п. л. / 0,3 п. л.

9. **Тихонова, О. В.** Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, А. Т. Пластун // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – № 1. – С. 21-35, 0,53 п. л. / 0,2 п. л.

10. **Tikhonova, O.** Analysis of the Electromagnetic Parameters of an Induction Motor with Ring Windings with Ceramic Insulation / O. Tikhonova, I. Malygin, S. Kulakov, A. Plastun // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, pp. 1280–1283, 0,38 п. л. / 0,095 п. л. (Scopus)

Патенты

11. Пат. 2684898 Российская Федерация, МПК⁶ Н 02 К 1/16, Н 02 К 3/238. Якорь многофазной электрической машины / Бердичевский А. С., Пластун А. Т., Тихонова О. В. и др. ; заявитель и патентообладатель УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина – № 2018111892; заявл. 02.04.2018 ;опубл. 16.04.2019, Бюл. № 11. – 38 с. : ил.

Публикации в других изданиях:

12. Тихонова, О. В. О целесообразности введения прикладного пакета «ANSYS Maxwell» в учебную программу для бакалавров / О. В. Тихонова, А. Т. Пластун // Сб. научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (Новосибирск, 02-06 декабря 2014 г.). – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2015. – С. 129-132, 0,17 п. л. / 0,08 п. л.

13. Тихонова, О. В. Особенности моделирования асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками в программном пакете «ANSYS Maxwell» / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, С. Л. Кулаков // Сб. трудов IX Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 01-05 декабря 2015 г.). – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2015. – С. 66-68, 0,1 п. л. / 0,033 п. л.

14. Тихонова, О. В. Моделирование и расчет асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками в программном пакете «ANSYS Maxwell» / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, А. Т. Пластун // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 231-233, 0,05 п. л. / 0,02 п. л.

15. Тихонова, О. В. Некоторые особенности применения пакета «ANSYS MAXWELL» для расчета электрических машин / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, А. Т. Пластун // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием : в 2-х томах. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – Т. 1. – С. 228-230, 0,1065 п. л. / 0,0355 п. л.

16. 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» / Р. К. Берая, **О. В. Тихонова**, И. В. Малыгин [и др.] // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института, Екатеринбург, Россия, 16-20 мая 2016 г. — Екатеринбург : [УрФУ], 2016. — С. 222-225, 0,15 п. л. / 0,038 п. л.

17. Берая, Р. К. Изучение влияния демпферной обмотки на работу синхронной машины в несимметричных режимах в программном пакете «ANSYS Maxwell» / Р. К. Берая, **О. В. Тихонова**, И. В. Малыгин [и др.] // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института, Екатеринбург, Россия, 16-20 мая 2016 г. — Екатеринбург : [УрФУ], 2016. — С. 226-230, 0,188 п. л. / 0,047 п. л.

18. **Тихонова, О. В.** Моделирование и расчет подвозбудителя с постоянными магнитами в среде «ANSYS Maxwell» / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, А. Т. Пластун // Труды II международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», Челябинск, Россия, 19-20 мая 2016 г. – Челябинск : [ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)], 2016. – С. 376-380, 0,24 п. л. / 0,08 п. л.

19. **Тихонова, О. В.** Расчет индуктивностей обмоток статора в асинхронном двигателе с кольцевыми обмотками с помощью пакетов «ANSYS» и «ANSYS Maxwell» / О. В. Тихонова, И. В. Малыгин, А. Т. Пластун // Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. — Екатеринбург: УрФУ, 2017. — С. 260-264, 0,26 п. л. / 0,08 п. л.

20. **Тихонова, О. В.** Расчет потокосцеплений в зубцовых наконечниках и зубцовых сердечниках АДКО с керамической изоляцией / О. В. Тихонова, Б. С. Саидов, А. Т. Пластун – Текст : непосредственный // Труды международной конференция «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика.» / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 10-14 декабря, 2018 г, 0,13 п. л. / 0,04 п. л.