

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*доктора технических наук, доцента Мошкина Владимира Ивановича
на диссертацию Тихоновой Ольги Валерьевны
«Разработка цифровых моделей и совершенствование конструкции асинхронного
двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками», пред-
ставленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

Актуальность темы диссертации

Увеличение объема производства атомной энергии вызывает необходимость решения проблемы, связанной с переработкой ядерных отходов. Процесс переработки отходов происходит в специальной радиационно-защитной камере, приводными механизмами которой выступают асинхронные двигатели малой и средней мощности.

По причине разрушения изоляции насыпной обмотки статора, связанного с работой в условиях высокой температуры и радиации, двигатель выходит из строя, становится неремонтопригодным и требует замены. Срок службы двигателя при этом не превышает 3-6 месяцев.

Продлить срок службы двигателя, а значит, сократить расходы, связанные с утилизацией двигателя и заменой его на резервную машину, можно с помощью применения керамической изоляции для обмотки статора. Однако при этом возникает другая проблема – невозможности формирования катушки в виде «лодочки» и укладки насыпной обмотки в полузакрытый паз статора, поскольку керамическая изоляция обладает низкой механической прочностью при ее деформации на изгиб.

С целью минимизации угла сгиба изоляции при формировании катушки необходимо использовать катушки более простой формы, например, в форме кольца. Тогда необходимо разработать принципиально новую конструкцию якоря асинхронного двигателя, позволяющую использовать готовые катушки кольцевой формы при сборке двигателя. Конструкция якоря машины переменного тока с кольцевыми обмотками подробно описана и представлена в патенте РФ 2121207.

Первый опытный образец асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками (далее – АДКО) был спроектирован на базе двигателя общепромышленного применения АО2-32-6. Однако испытания первого опытного образца показали, что максимальный момент АДКО ниже, чем серийного асинхронного двигателя, выполненного в тех же габаритах. В связи с вышесказанным цель представленной соискателем работы – увеличение максимального момента двигателя типа АДКО путем изменения его конструкции и использования уточненных цифровых моделей.

Тема диссертации является актуальной и нацелена на решение важной

задачи разработки асинхронного двигателя высокой надежности для работы в тяжелых условиях.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации

При работе над диссертацией Тихоновой Ольгой Валерьевной использовались аналитические методики электромагнитного расчета, изложенные в известных пособиях по проектированию электрических машин, а также применяемые на предприятиях-изготовителях серий асинхронных двигателей. Для анализа двигателя типа АДКО автор предлагает использовать прикладные программные пакеты, в основе работы которых лежат методы конечных элементов.

Исследование предполагает разработку и построение цифровых расчетных моделей АДКО в 3D-режиме, поэтапно учитывающих особенности физических процессов реального двигателя. Такой подход позволяет, постепенно усложняя модель, проверять промежуточные результаты электромагнитного анализа двигателя, ориентируясь на теорию, изложенную в пособиях по электрическим машинам и теоретической электротехнике.

Сформулированные автором работы выводы по каждой главе подтверждены расчетными данными, полученными в результате проведенных цифровых экспериментов.

Конструктивные изменения, вносимые в электромагнитное ядро двигателя с целью повышения его максимального момента, также апробируются на цифровых моделях, с помощью которых либо подтверждается, либо опровергается их эффективность.

Цель, поставленная автором в работе, достигнута, поставленные задачи выполнены.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность основных научных результатов диссертации Тихоновой Ольги Валерьевны подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических результатов, полученных с помощью цифровых расчетных моделей, с данными испытаний первого и второго опытных образцов АДКО. 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.

Полученные результаты исследований также докладывались на всероссийских и международных конференциях:

– «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные

и возобновляемые источники энергии», г. Екатеринбург, 2018 г.;

– 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.

Все изложенное позволяет сделать заключение о достоверности положений, выносимых на защиту.

Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертационное исследование, изложенное на 296 страницах машинописного текста, содержит введение, пять глав, заключение, библиографический список из 90 наименований и два приложения.

Во **введении** автором обосновывается актуальность темы исследования, определяется цель и задачи, описывается используемая в работе методология, теоретическая и практическая значимость, формулируется научная новизна полученных результатов.

Первая глава диссертации посвящена исследованию распределения магнитного поля в магнитной системе АДКО. Особенностью предложенной в работе конструкции двигателя является двухуровневое преобразование поля: пульсирующее магнитное поле, созданное соосными катушками, преобразуется во вращающееся магнитное поле с помощью сформированной специальным образом магнитной системы. При этом рабочий магнитный поток имеет две составляющие – осевую и радиальную, что говорит о необходимости решения объемной, а не плоской задачи.

Автором рассматривается распределение магнитного поля по участкам магнитной цепи для трех случаев:

1) без учета насыщения магнитной системы, когда магнитная проницаемость принята равной $\mu_{ст} \leq \infty$, коэффициент заполнения системы сталью принят равным 1;

2) с учетом насыщения стали магнитной системы, когда магнитная проницаемость задается согласно характеристике намагничивания стали марки Э 2211, коэффициент заполнения системы сталью принят равным 1;

3) с учетом насыщения стали магнитной системы, когда магнитная проницаемость задается согласно характеристике намагничивания стали марки Э 2211, а также с учетом изоляционной оксидной пленки листов сердечника ста-

тора.

Для каждого случая автором строится картина распределения индукции магнитного поля в воздушном зазоре, определяются значения магнитного потока по участкам цепи – зубцовым сердечникам, зубцовым наконечникам, в ярме статора.

Для определения коэффициента насыщения магнитной цепи для каждой фазы обмотки статора строится своя замкнутая линия обхода магнитного контура. Коэффициенты насыщения магнитной цепи при питании каждой фазы обмотки статора отличаются друг от друга менее чем на 5 %, что говорит о симметрии двигателя в магнитном соотношении.

На основе проведенных исследований автором делаются выводы о справедливости принципа формирования вращающегося магнитного поля с помощью специальным образом распределенных в пространстве магнитных масс. В главе 1 показано, что распределение магнитного поля в воздушном зазоре АДКО аналогично асинхронным машинам классического исполнения.

Вторая глава исследования связана с определением коэффициентов рассеяния магнитного потока. Полный магнитный поток рассеяния делится автором на три части, для каждой из которых определяется так называемый частичный коэффициент рассеяния:

- 1) коэффициент рассеяния зубцовых наконечников;
- 2) коэффициент рассеяния зубцовых сердечников;
- 3) коэффициент рассеяния лобовой части обмотки статора.

Проведенный анализ показывает, что большую часть потока рассеяния составляет поток рассеяния зубцовых наконечников. На основании данного расчета автором делается вывод о завышенной высоте зубцового наконечника.

Анализ коэффициентов рассеяния проводится для трех случаев магнитной цепи, аналогичных главе 1, при этом вихревые токи не учитываются.

Проведенные исследования показывают, что при учете в цифровой модели первого опытного образца изоляционной оксидной пленки листов сердечника статора и насыщения стали, магнитный поток рассеяния превышает магнитный поток взаимоиндукции в два раза, что является одной из причин пониженного значения момента двигателя типа АДКО.

В **третьей главе** автором проводится определение индуктивных сопротивлений двигателя типа АДКО в статическом режиме анализа цифровых расчетных моделей. Так же, как и в предыдущих главах, модель постепенно усложняется: на первом этапе расчет проводится без учета оксидной изоляционной пленки, на втором этапе пленка учитывается. С помощью определения индуктивных сопротивлений автором подтверждается вывод, сделанный в главе 2: индуктивное сопротивление рассеяния первого опытного образца АДКО превышает взаимное индуктивное сопротивление в два раза.

Для уменьшения магнитного сопротивления осевой составляющей магнитного потока и, следовательно, увеличения взаимоиндукции в третьей главе

автором предлагается применить шунтирующие магнитные вставки, разместив их в ярме сердечника статора, разместив их в специально вырезанных по внешнему диаметру статора пазах.

Эффективности применения шунтирующих магнитных вставок подтверждается расчетными значениями индуктивных сопротивлений двигателя типа АДКО и потокосцеплений.

Второй опытный образец двигателя типа АДКО спроектирован с учетом шунтирующих магнитных вставок.

В четвертой главе представлена схема замещения двигателя типа АДКО, имеющего двухстаторную магнитную систему, при этом первый статор сдвинут относительно второго на угол $30/p$ геометрических градусов вокруг оси вращения. Сдвиг одной половины машины относительно другой учитывается путем введения во вторичную цепь двух дополнительных ЭДС.

В пятой главе автором описываются особенности динамического анализа цифровых моделей первого и второго опытных образцов АДКО, при котором моделируется вращение ротора при питании обмотки статора трехфазным напряжением.

В режиме цифровой лаборатории в прикладном программном пакете "ANSYS" автором проводятся расчеты по определению характеристик холостого хода и короткого замыкания двигателя, которые сравниваются с результатами проведенных лабораторных испытаний. Механические характеристики первого и второго опытных образцов также определяются в динамическом режиме. В работе отмечается, что ток холостого хода первого опытного образца превышает ток холостого хода общепромышленного асинхронного двигателя в 5 раз, поскольку рабочий магнитный поток идет поперек листа статора в зубцовых сердечниках.

Автором сравниваются максимальные моменты первого и второго опытных образцов АДКО и отмечается увеличение данного параметра в 1,7 раза благодаря шунтированию магнитного потока в ярме двигателя, уменьшению высоты зубцового наконечника. Для снижения токов холостого хода во втором опытном образце число витков в катушке статора увеличивается в 1,7 раза.

Для увеличения максимального момента двигателя в пятой главе автором предлагается перейти на большую высоту оси вращения двигателя, соблюдая условие постоянства площади полюсного деления.

Для увеличения взаимного индуктивного сопротивления автором также предлагается применение коротких зубцовых наконечников, которые следует разместить между двумя соседними длинными зубцовыми наконечниками. Сталь зубцовых наконечников – и коротких, и длинных – следует заменить на анизотропную.

Предложенные конструктивные изменения проверяются на расчетных цифровых моделях, автором приводятся результаты проведенных исследова-

ний в виде графических зависимостей и численных значений максимальных моментов.

В заключении диссертации приводятся выводы и результаты проведенного исследования, даются рекомендации по дальнейшей проработке темы.

Научная новизна исследования

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_s) 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.

Замечания по диссертации

Положительно оценивая диссертацию в целом, ее логику, обоснованность, достоверность, полученные новые научные результаты, теоретическую и эмпирическую базу исследования, следует выделить следующие дискуссионные положения, недостатки и замечания:

1) Согласно описываемой в главе 1 конструкции электромагнитного ядра двигателя типа АДКО, зубцовый наконечник укладывается в пазы зубцовых сердечников. Автором не рассматриваются механические силы, действующие на наконечник, и надежность крепления наконечника в пазах сердечника.

2) Автором не проводится анализ гармонического состава кривой индукции в воздушном зазоре, хотя в работе утверждается, что 5-ая и 7-ая гармоника поля уничтожаются с помощью сдвига двух половин магнитной си-

стемы друг относительно друга.

3) Автором утверждается, что изменение высоты зубцового наконечника второго опытного образца АДКО связано с желанием снизить поток рассеяния зубцовых наконечников, но при этом в работе нет обоснования выбора именно такого значения высоты наконечника.

4) Автором не указывается номинальная точка работы двигателя типа АДКО.

5) Вызывает сомнение вид расчетной кривой механической характеристики первого опытного образца с учетом активных сопротивлений. На мой взгляд, объяснение сдвига кривой момента по причине изменения активных сопротивлений обмоток статора и ротора звучит недостаточно убедительно.

6) Автором предлагается применение коротких зубцовых наконечников, но не описывается способ их фиксации в магнитной системе.

Заключение

Диссертация Тихоновой Ольги Валерьевны на тему «Разработка цифровых моделей и совершенствование конструкции асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, в которой решается научная и инженерная задача. Диссертантом разработаны и предложены способы решения поставленных задач, даны рекомендации по изменению конструкции двигателя типа АДКО, приведены расчетные и опытные данные в подтверждение рекомендаций, изложенных в работе.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям Паспорта 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.

Автореферат диссертации О. В. Тихоновой полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследова-

