

## ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора Казакова Юрия Борисовича  
на диссертацию Тихоновой Ольги Валерьевны

"Разработка цифровых моделей и совершенствование конструкции асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

### **На отзыв представлены:**

- диссертация, изложенная на 296 страницах (из них 252 страницы основного текста), состоящая из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 90 наименований, и двух приложений;
- автореферат диссертации.

### **Актуальность темы диссертации**

В диссертации рассматривается асинхронный двигатель, предназначенный для работы в качестве приводного механизма установки в радиационно-защитной камере, где происходит процесс переработки ядерных отходов. Срок службы асинхронных двигателей со насыщенной обмоткой статора из-за радиационного разрушения лаковой изоляции обмотки составляет не более 6 месяцев. Продлить срок службы двигателей до 2-3 лет возможно применением керамической изоляции обмотки статора. Но из-за низкой механической прочности при деформации керамической изоляции на изгиб обмотки статора необходимо применять катушки с минимальным углом сгиба, например, кольцевые катушки. В диссертации анализируются асинхронные двигатели с кольцевыми обмотками (АДКО) и конструкцией магнитной системы, позволяющей осуществлять укладку кольцевых катушек обмотки статора без деформации при сборке двигателя. Разработанные ранее АДКО имеют невысокий электромагнитный момент и низкие энергетические характеристики, для расчета двигателей отсутствуют корректные модели, учитывающие конструктивные особенности магнитной системы и обмотки, трехмерный характер распределения магнитного поля, целесообразно совершенствование конструкции АДКО. В связи с этим актуальность диссертации Тихоновой О.В.,

посвященной разработке цифровых моделей и совершенствованию конструкции асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками, не вызывает сомнений.

**Цель диссертации** - повышение максимального электромагнитного момента асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками путем совершенствования конструкции двигателя и применения уточненных цифровых моделей соответствует направлениям исследований специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Для достижения цели и решения поставленных **задач диссертации** автором использовались современные **методы исследований**: аналитические методы общей теории электромеханических преобразователей энергии, численные методы компьютерного моделирования электромагнитных полей на основе метода конечных элементов, реализованные в распространенных программных комплексах, сравнение с опытными результатами.

**Оценка содержания и оформления диссертации.** Диссертация написана ясно, использованная терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам. Структура диссертации традиционная, имеет внутреннее единство, по каждой главе и диссертации в целом сделаны выводы, которые отражают результаты работы. Даны рекомендации практического применения результатов диссертации и перспективы развития темы. При использовании в тексте диссертации результатов других авторов сделаны соответствующие ссылки.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, выполнен анализ научных разработок в рассматриваемой области, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации приводится описание конструкции АДКО для числа пар полюсов  $p=1$  и  $p=3$ . Первый опытный образец АДКО с  $p=3$  на высоту оси вращения  $h=112$  мм представляет собой каскад из двух машин, объединенных общим ротором с короткозамкнутой алюминиевой клеткой. Статор одного двигателя сдвинут относительно статора другого на  $30/p$  геометрических градусов вокруг оси вращения. Конструкция требует использования 3D-моделей для проведения расчетов, поскольку магнитное поле АДКО винтообразно и имеет радиальную, тангенциальную и осевую



составляющие. Проведенный анализ картины распределения магнитного поля показал, что распределение магнитной индукции в воздушном зазоре АДКО подобно распределению магнитной индукции в зазоре асинхронного двигателя общепромышленного исполнения. Симметрия двигателя в магнитном соотношении оценивалась посредством расчета коэффициентов насыщения магнитной цепи при питании отдельно взятой фазы обмотки статора.

**Во второй главе** на основе цифровой модели проводится оценка частичных и полного коэффициентов рассеяния магнитного потока первого опытного образца АДКО для одно- и трехфазного режимов питания обмотки статора. Показано, что поток рассеяния первого опытного образца АДКО в два раза превышает величину потока взаимоиндукции, при этом большую часть потока рассеяния составляет поток рассеяния зубцовых наконечников.

**В третьей главе** рассчитываются индуктивные сопротивления рассеяния и взаимоиндукции двигателя, проводится оценка эффективности шунтирующих магнитных вставок в ярме сердечника статора, используемых для уменьшения сопротивления для осевой составляющей магнитного потока.

**В четвертой главе** разработаны схемы замещения АДКО с учетом сдвига двух статоров друг относительно друга на  $30/p$  геометрических градусов по оси вращения путем введения во вторичную цепь двух дополнительных ЭДС.

**В пятой главе** проводится анализ цифровых моделей первого и второго опытных образцов АДКО, включающих расчет характеристик холостого хода, короткого замыкания и механических характеристик. Полученные в работе расчетные данные сравниваются с результатами испытаний для подтверждения корректности разработанных цифровых моделей. Выполнено сравнение механических характеристик первого и второго опытных образцов с учетом влияния изменений, внесенных в конструкцию электромагнитного ядра опытного второго образца АДКО. На цифровых моделях проведен анализ изменения максимального момента АДКО при переходе конструкции на большую высоту оси вращения с условием сохранения постоянства площади полюсного деления. Расчетным путем подтверждена эффективность применения коротких зубцовых наконечников из анизотропной электротехнической стали для увеличения максимального момента АДКО.

**В заключении** обобщаются результаты проведенных исследований, содержатся выводы, определены перспективы дальнейших исследований конструкции АДКО.

#### **Научная новизна результатов:**

1. Разработаны цифровые расчетные модели асинхронных двигателей с кольцевыми обмотками, **отличающиеся** возможностью учета особенностей конструкции магнитной системы и обмотки, влияния вихревых токов, изоляционной оксидной пленки листов сердечника статора, насыщения магнитной цепи на максимальный момент двигателя для разных режимов работы двигателей.

2. Разработана схема замещения асинхронных двигателей с кольцевыми обмотками, **отличающаяся** учетом двухстаторной конструкции магнитной системы, в которой статоры сдвинуты друг относительно друга на угол  $30/p$  градусов.

3. На основании цифрового моделирования электромагнитного состояния асинхронных двигателей с кольцевыми обмотками выявлена линейная зависимость целесообразного изменения диаметра статора и длины магнитопровода при переходе на большую высоту оси вращения, **отличающаяся** от квадратичной зависимости для двигателей общепромышленного исполнения.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии теории асинхронных двигателей с кольцевыми обмотками и двухстаторным исполнением, в создании компьютерных трехмерных цифровых моделей электромагнитного состояния двигателя на основе численного анализа методом конечных элементов, в разработке схемы замещения, способов определения параметров и характеристик двигателя таких двигателей.

**Практическая значимость** работы заключается в применении разработанных моделей, методик расчета, способов определения параметров и характеристик асинхронных двигателей с кольцевыми обмотками в научно-исследовательских и проектных организациях, в рекомендации выполнения минимума зубцовых наконечников для двухстаторной конструкции в целях



увеличения рабочего потока, в совершенствовании конструкции двигателя, в использовании результатов диссертации при разработки асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками в ЗАО «Уралэлектромаш» г. Каменск-Уральский. Практическая значимость диссертации подтверждается зарегистрированным патентом на изобретение.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и результатов диссертации обусловлена использованием известных математических методов теории электромеханического преобразования энергии, компьютерным трехмерным моделированием электромагнитного состояния двигателя на основе численного анализа методом конечных элементов в распространенных программных комплексах, подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных результатов с результатами испытаний опытных образцов двигателя.

**Оценка научной квалификации автора.** Тихонова О.В. обладает высокой научной квалификацией - ею разработаны уточненные цифровые трехмерные модели асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками на основе метода конечных элементов, методики расчета, способы определения параметров и характеристик таких электродвигателей, предложено совершенствование конструкции двигателя.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует следующим пунктам направлений исследования научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

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.

**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.**

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертации обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях.

**Соответствие автореферата содержанию диссертации.** Автореферат в компактном виде отражает содержание и основные положения диссертации, содержит выводы и полученные результаты. По автореферату можно оценить значимость проведенных исследований.

#### **Замечания:**

1. В диссертации представлено исследование и совершенствование двухстаторного асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками с керамической изоляцией, работающего в установках переработки ядерных отходов с радиационным воздействием на изоляцию обмотки. Однако не оценено влияние предлагаемого совершенствования усложненной конструкции на надежность двигателя.

2. У рассматриваемых двигателей  $X_1 > X_m$ , что свидетельствует о нерациональности магнитной системы.

3. В цифровых моделях двигателя учитывается осевая составляющая магнитного потока лишь в зубцовых сердечниках и ярме сердечника статора, но не учитывается влияние вихревых токов и воздушных зазоров в зубцовых наконечниках.

4. Не оценены механическая прочность элементов конструкции и тепловой режим работы двигателя, однако указано, что температура обмотки может составлять  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  и даже  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (стр. 216).

5. Корректный расчет двухстаторного асинхронного двигателя с кольцевыми обмотками требует использования трехмерных моделей магнитного



поля, что не всегда приемлемо на практике. Практическая значимость работы была бы выше при разработке аналитической методики расчета таких машин.

6. Рекомендация перехода конструкции на большую высоту оси вращения с сохранением постоянства площади полюсного деления, отличная от принятой для машин общепромышленного исполнения, корректно не обоснована.

7. Замечания оформления, стилистические и орфографические: чрезмерный объем диссертации – 253 стр. основного текста, без большого ущерба для значимости диссертации некоторые из 148 иллюстраций и 76 таблиц можно было вынести в Приложения; пункт 4 научной новизны не является новым; два рис. с одинаковыми номерами 1.10.1 и 1.10.2; соотношение 1.2 – пропущен угол  $\alpha$ , соотношение 1.3 – пропущены знаки интеграла, соотношение 1.8 должно записываться в векторной форме; в выводах по главе 4 про схемы замещения двухстаторного АДКО нет ни слова собственно про саму схему замещения; рис. 3.11.1 кривая б, рис. 3.12.2 кривая 2, п.7 выводов по главе 3 – снижение  $\Psi$  обмотки при возрастании намагничивающего тока не реально; не корректное суждение - шунтирующие магнитные вставки компенсируют влияние вихревых токов (стр. 238); не пояснены элементы  $\Delta E_{r2(+)}$  и  $\Delta E_{r2(+j)}$  в схемах замещения рис. 5.5.3 и 5.5.4, не пояснено как они рассчитываются;

Устранение данных замечаний позволило бы повысить качество научных исследований, но они не снижают научной ценности диссертации в целом.

### **Заключение**

Диссертация Тихоновой Ольги Валерьевны "Разработка цифровых моделей и совершенствование конструкции асинхронного двигателя с двухстаторной магнитной системой и кольцевыми обмотками" является законченной научно-квалификационной работой, которая по содержанию, объекту и направлению исследований, полученным новым научным результатам соответствует специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Диссертационная работа выполнена Тихоновой Ольгой Валерьевной лично, на актуальную тему, имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость, содержит решение актуальной задачи, связанной с разработкой, исследованием и совершенствованием электродвигателей для переработки ядерных отходов.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным в пункте 9 Положения и присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина", предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Тихонова Ольга Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, доктор технических наук (докторская диссертация защищена по специальности 05.09.01 – Электромеханика), профессор, профессор кафедры "Электромеханика" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ). (153003, Россия, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ, корп. А, ауд. 149 Телефон: +7(493)226-97-015. E-mail: elmash@em.ispu.ru)

Я, Казаков Юрий Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Казаков Юрий Борисович

Дата составления отзыва " 14 " марта 2024 г.

Подпись д. т. н., профессора Казакова Ю. Б. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ИГЭУ

Вылгина Юлия Вадимовна

