

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента по диссертационной работе Горожанкина Алексея Николаевича «Развитие теории синхронных реактивных и индукторных электрических машин», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

### **На отзыв представлены**

1. Диссертация «Развитие теории синхронных реактивных и индукторных электрических машин», содержащая введение, шесть глав, заключение, список литературы из 225 наименований и приложение. Работа изложена на 305 страницах, содержит 90 рисунков и 63 таблицы.
2. Автореферат диссертации.

### **1. Актуальность работы**

На сегодняшнем этапе развития силовой, информационной электроники, информационного обеспечения, а также новых технологий изготовления электрических машин (например, лазерная резка листов электротехнической стали) появилась возможность проектирования новых серий электрических машин, которые работают только в замкнутой системе от электрических преобразователей и рассчитаны на работу в зонах перегрузок по моменту и высоких скоростей вращения ротора, что позволяет улучшить потребительские свойства электрических машин (например, массогабаритные показатели, КПД). Наилучшим образом приспособлены для работы в указанных зонах синхронные реактивные и индукторные электрические машины, которые обладают бесконтактностью, высокой перегрузочной способностью, безобмоточным ротором, который приспособлен к высоким скоростям вращения. При этом обладают простотой технологичной конструкцией. Новые серии электромеханических преобразователей наиболее эффективны в металлургической, нефтегазовой отраслях в качестве основы для электропривода мощных агрегатов (прокатные станы, электроприводы для буровых установок). Еще одна сфера применения – тяговый электропривод, где актуальны хорошие массогабаритные показатели, высокие скорости вращения ротора и широкие диапазоны изменения нагрузки и скорости. В силу вышесказанного тема диссертационной работы является актуальной.

### **2. Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация Горожанкина Алексея Николаевича содержит введение, шесть глав, заключение и приложение.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель, задачи и методы исследования, научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор литературы с позиции проработанности исследований в области оптимизации класса синхронных реактивных и индукторных электрических машин для работы в расширенных диапазонах

скоростей и моментах нагрузки. Отмечается разная степень исследованности работы в указанных диапазонах каждого типа электрической машины внутри класса, делается вывод о несистемном и частном характере исследований. Предлагается объектно-ориентированная стратегия проектирования, т.е. учет режимов работы электрической машины, когда нет смысла проектировать электрическую машину под номинальный режим работы в силу того, что она в нем, например, никогда не работает. Это особенно актуально, когда речь заходит об уникальных мощных электроприводах металлургического производства.

Во второй главе исследуются предельные возможности синхронных реактивных и индукторных электрических машин с позиции эффективности электромеханического преобразования по широкому спектру показателей (электромагнитный момент, активная мощность, полная мощность, коэффициент мощности). Выделяются факторы и параметры, которые влияют на указанные показатели. Даются рекомендации по выбору этих параметров.

В третьей главе на основании обобщенной оценки возможностей каждого типа электрической машины выбираются для дальнейшего исследования несколько наиболее перспективных типов и исключается индукторная машина с «гладким» статором из-за низких удельных показателей. Предлагается обобщенный алгоритм и метод оптимизации геометрических размеров элементов магнитопроводов электрических машин, приведены результаты оптимизации величины максимального электромагнитного момента на угловых характеристиках. Показано, что наилучшее соотношение «медь-сталь» смещается в сторону последней для повышения отношения реактансов по продольной и поперечной осям машин. Исследована чувствительность удельного момента к изменению величины воздушного зазора, что позволило сделать выводы о наиболее благоприятных диапазонах мощностей для машины каждого типа.

В четвертой главе с учетом коммутации обмоток предложен метод двухэтапной оптимизации величины удельного момента и его пульсаций. Показана противоречивость этих двух показателей. Получены наилучшие диаграммы фазных токов для разных нагрузок, в которых присутствует помимо основной гармоники еще и третья гармоника, а для машин с «зубцовыми» обмотками еще и четный ряд гармоник.

В пятой главе исследуются потери в стали, так как в зонах перегрузок и высоких скоростей вращения они могут достигать высоких значений. Делаются выводы о величине и характере распределения этих потерь для разных типов машин. Эти исследования могут быть полезны как для работы в двигательном режиме работы, так и в генераторном. Проводится ряд экспериментальных исследований для проверки адекватности расчета потерь. Предлагается метод поддержания максимального электромагнитного момента при разных скоростях и моментах нагрузки, основанный на максимизации входной активной мощности при фиксированных значениях тока и скорости, предлагается алгоритм для вычислительного устройства, реализующего такой алгоритм.

В шестой главе приводятся результаты натуральных экспериментов на нескольких типах синхронных реактивных машин. Измеряются и сопоставляются с теоретическими результатами величины момента, напряжения, коэффициента мощности, величины собственных и взаимных индуктивностей обмоток. Предлагается методика выбора электрических машин с учетом требований технологического процесса.

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационного исследования.

В приложении содержится 5 актов о внедрении результатов диссертационной работы.

### **3. Научные результаты работы и их новизна**

На обобщенной аналитической математической модели проанализированы параметры электрических машин, влияющие на их удельные показатели. Исследован спектральный состав гармоник индукции и МДС вблизи воздушного зазора, показано его влияние на электромагнитный момент, активную, полную мощности, коэффициент мощности. Это позволило наметить дальнейшие мероприятия, улучшающие потребительские свойства класса синхронных реактивных и индукторных электрических машин. Предлагаются методы и обобщенные алгоритмы оптимизации удельного момента, его пульсаций как на уровне конструктивных изменений, так и меры алгоритмического характера в широких диапазонах изменения скоростей и моментов нагрузки рабочего органа.

### **4. Основные практические результаты работы**

Полученные обобщенные результаты оптимизации геометрических параметров магнитопроводов позволяют получить инженерные методики расчета новых серий электрических машин, рассчитанных на работу в зоне перегрузок или высоких скоростей вращения ротора. Алгоритмы управления и формирования токовых диаграмм фазных обмоток могут быть полезны на этапе наладки работы электропривода с синхронными реактивными и индукторными электрическими машинами. Практическую направленность имеет методика выбора наилучшего типа электрической машины в зависимости от области применения

### **5. Достоверность и обоснованность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных результатов исследования определялась корректностью постановки задач, обоснованностью принятых допущений, подтверждается удовлетворительным для инженерной методики совпадением основных теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных из физического эксперимента, точностью исходных данных, правомерностью использования теории.

### **6. Апробация работы и публикации**

В полном объеме работа докладывалась и обсуждалась на заседаниях кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск; на научно-техническом совете ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электроэнергетики и электротехники, г. Томск. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях различного уровня.

По теме диссертации опубликовано 67 печатных работ, в том числе 21 научная статья, входящая в перечень ВАК РФ, 19 статей в Международной базе цитирования Scopus, 15 статей и тезисов докладов на научно-технических конференциях, 7 патентов РФ на изобретение и 8 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

## 7. Замечания и дискуссионные положения

К диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Автором предложена классификация, в которой выделено 8 типов синхронных реактивных и индукторных машин. При этом в автореферате нет ни одного изображения машины в разрезе, что затрудняет восприятие материала.
2. В диссертации и автореферате часто используются словесные описания математических зависимостей, например «...пазовый ток пропорционален корню квадратному из площади паза...». Было бы более целесообразно записать это математической формулой.
3. В диссертационной работе автор очень подробно исследует процессы в электрических машинах, но совсем не касается полупроводниковых преобразователей – нет ни схем, ни анализа параметров силовых ключей. Хотя характеристики привода в значительной степени определяются полупроводниковой частью.
4. Автор предлагает законы регулирования для синхронных реактивных и индукторных машин, но при этом в диссертации отсутствуют схемы систем управления.
5. В математических выражениях коэффициент мощности обозначается разными буквами, такими как  $\lambda$ ,  $k_M$ , тогда как есть общепринятое обозначение  $\cos \varphi$ .

## 8. Общее заключение по диссертации

Считаю, что несмотря на приведенные замечания, диссертация Горожанкина Алексея Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней изложены новые, научно-обоснованные меры улучшения потребительских свойств класса синхронных реактивных и индукторных электрических машин новых серий, работающих в зонах перегрузок по моменту и высоким скоростям вращения ротора.

Анализ диссертационной работы в целом позволяет сделать вывод о том, что содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы». Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание.

Диссертационная работа «Развитие теории синхронных реактивных и индукторных электрических машин» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук согласно п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 №842) с изменениями постановления правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в положение о присуждении ученых степеней», а ее автор Горожанкин Алексей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени

доктора технических наук по специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент  
д-р. техн. наук, доцент  
заведующий кафедрой электротехники  
и электрооборудования предприятий  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

*M. Ibragimov*  
19.09.2023

Хакимьянов Марат Ильгизович

Адрес: 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1 тел.: (347) 2420759; e-mail: hakimyanovmi@gmail.com

Докторская диссертация Хакимьянова М.И. защищена по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Подпись Хакимьянова М.И. заверяю  
проректор по научной  
и инновационной работе,  
доктор технических наук, профессор



*I. G. Ibragimov*  
И. Г. Ибрагимов