



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)  
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia  
Tel. +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations): 02069303,  
Company Number: 027000890168,  
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)  
7018007264/701701001, БИК 016902004

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет» (ТПУ)  
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия  
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,  
факс +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru  
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,  
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 016902004

09.11.2023

№ 03/9068  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
Об исправлении опечатки в отзыве ведущей  
организации

Председателю  
диссертационного совета  
24.2.437.14  
ФГАОУ ВО «Южно-Уральского  
Государственного университета  
(национального  
исследовательского  
университета)», д.т.н., доценту  
Коржову А.В.

Уважаемый Антон Вениаминович!

Настоящим уведомляю, что в отзыве ведущей организации на докторскую диссертацию Горожанкина Алексея Николаевича «Развитие теории синхронных реактивных и индукторных электрических машин» допущена опечатка на стр. 6. Доклад по теме диссертации и обсуждение отзыва к ней на научно-техническом собрании отделения электротехники и энергетики и отделения автоматизации и робототехники были 22 июля 2023 года, а не 22 июня 2023, как это написано в отзыве.

И.о. проректора по науке и  
стратегическим проектам



А.С. Гоголев

Исп. Кладиев Сергей Николаевич  
Т. +7(3822)701777 вн 3448

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. проректора по науке и  
стратегическим проектам  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ,



Гоголев А.С.

2023

## **ОТЗЫВ**

**ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»**  
на диссертацию 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»

### **1. Актуальность темы исследования**

Развитие техники и технологии приводит к расширению возможностей проектирования электрических машин с одной стороны и ужесточает требования по энергоэффективности, материалоёмкости, себестоимости изготовления, с другой стороны. Класс синхронных реактивных и индукторных электрических машин является перспективным для достижения целевых показателей эффективности. Отличительной особенностью машин данного класса является несимметричный в магнитном отношении ротор. Сюда включены вентильно-индукторные машины, синхронные реактивные машины, машины с переключением поля, машины с распределенными обмотками и редукцией скорости. Новые технологии изготовления электрических машин, такие как лазерная резка листов электротехнической стали, новые эффективные материалы в сочетании с существенным прогрессом в области информационной и силовой электроники позволили вести проектирование электрических машин средней и большой мощности, в том числе уникальных машин для металлургического производства, под заданные нагрузки и скорости вращения ротора. Новый подход к проектированию закладывает научные основы проектирования новых серий электрических машин рассматриваемого класса и позволяет улучшить их потребительские свойства. Системных исследований в рамках данного подхода нет. В связи с вышеизложенным исследования являются актуальными.

## 2. Новизна и практическая значимость работы

Работа закладывает научные основы для проектирования электрических машин исследуемого класса под конкретные нагрузки и скорости вращения ротора как на этапе конструирования, так и на этапе наладки путём формирования наилучших алгоритмов управления, позволяет сформулировать требования к электрическому преобразователю.

*Теоретическая ценность работы* заключается в следующем:

1. Получены аналитические и численные математические модели с сосредоточенными параметрами электромеханического преобразования энергии в обобщённом виде и с учётом особенностей каждого типа электрической машины в рамках исследуемого класса, отличающиеся тем, что позволяют рассчитать не только электромагнитный момент, но и активную и полную потребляемую мощности, коэффициент мощности, которые зависят как от геометрических параметров магнитной системы, так и от алгоритмов управления. Из аналитических выражений и численного моделирования получены рекомендации по значимым для эффективного электромеханического преобразования параметрам и их численным значениям.

2. Показано влияние геометрических параметров магнитной системы вблизи воздушного зазора на электромагнитный момент, активную и полную мощность. Выбран метод и разработан обобщённый алгоритм оптимизации элементов магнитопроводов машин исследуемого класса. Получены наилучшие соотношения, которые позволяют увеличить отношение реактансов по продольной и поперечной осям машины для широкого диапазона нагрузок. Показано изменение удельных показателей разных типов электрических машин исследуемого класса в зависимости от мощности.

3. Показано влияние высших гармоник в токовых диаграммах обмоток и количества фаз на удельные показатели машин во взаимосвязи с геометрическими параметрами магнитопроводов. Разработаны метод и алгоритм оптимизации формы токовых диаграмм обмоток для широкого диапазона нагрузок. Показано полезное влияние третьей гармоники для машин с распределёнными обмотками и зубчатым ротором, а также чётного ряда гармоник для машин с зубцовыми обмотками. Получены для разных типов машин и сопоставлены параметры напряжения, подаваемого на обмотки электрических машин исследуемого класса в широком диапазоне нагрузок. На основе этой информации появляется возможность формирования требований к электрическому преобразователю.

4. Выбран и верифицирован метод расчёта потерь в стали, которые рассчитаны для всех типов электрических машин исследуемого класса. Показано, что гармонический состав индукции в зазоре существенно влияет на потери в стали из-за проявлений магнитного скин-эффекта. Показано, что потери в стали существенно влияют на формирование токовых диаграмм обмоток. Предложены методы и алгоритм адаптивного регулирования угла

нагрузки для достижения максимальных удельных показателей при регулировании скорости и момента нагрузки в широком диапазоне.

5. Предложена методика выбора типа электрической машины в зависимости от требований технологического процесса на основе критерия Парето.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

1. Оптимальные соотношения размеров элементов магнитопроводов закладывают научные основы разработки инженерных методик проектирования и расчёта.

2. Оптимальные токовые диаграммы обмоток позволяют на этапе накладки электроприводов учитывать нагрузки и скорости вращения ротора.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов**

Достоверность математических моделей определяется исходными допущениями и их верификацией на основе экспериментальных данных. Научные положения и выводы вытекают из результатов моделирования.

### **4. Структура и объем диссертационной работы**

Работа состоит из введения, шести глав основного текста объемом 245 страниц и заключения, списка литературы из 225 наименований. Общий объем работы 305 страниц.

*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 состояния разработок в области синхронных реактивных и индукторных электрических машин. Показаны особенности проектирования разных типов электрических машин, которые относятся к синхронным реактивным и индукторным, как на уровне конструкции, так и на уровне алгоритмов управления. Указывается на несистемный характер исследований в части оптимизации машин для работы в расширенных диапазонах скоростей и моментов нагрузки. Следовательно, появляются резервы улучшения характеристик электромеханических преобразователей, работающих с конкретными механизмами и заданными нагрузочными диаграммами и тахограммами. Что особенно актуально для рабочих механизмов металлургического производства средней и большой мощности.

*Во второй главе* приводится анализ предельных возможностей электромеханического преобразования энергии в исследуемом классе электрических машин. Показана взаимосвязь между энергетическим подходом, как изменения запасенной энергии в обмотках в функции угла поворота ротора, и упрощённого подхода, как произведения индукции на плотность тока по расточке статора. Приводятся аналитические выражения для момента, активной и полной мощностей, расчёты коэффициента

мощности для каждой из машин в исследуемом классе. Выявлены факторы, влияющие на эффективность преобразования энергии, даны рекомендации по выбору параметров машин. Даны результаты расчёта удельных показателей, выполнено их сопоставление. Глава закладывает научные основы для дальнейшей оптимизации машин при перегрузках по моменту и больших скоростях вращения.

В *третьей главе* выполнена численная оценка влияния геометрии зубцовой зоны на удельные показатели. На основе асинхронной электрической машины средней мощности созданы конечно-элементные модели машин. Предложены метод и алгоритм оптимизации размеров элементов магнитопроводов, которые обладают хорошей сходимостью. Отмечены общие особенности изменения оптимальной геометрии для номинальной нагрузки и 4-х кратной перегрузки. Электрические машины исследуемого класса сопоставлены между собой по моменту. Оценена эффективность оптимизации в диапазоне от 0 до 20 %.

В *четвёртой главе* предлагается метод и алгоритм оптимизации формы токовых диаграмм, которые формируются источниками тока электрического преобразователя. Полученные диаграммы содержат первую и третью гармоники для машин с распределёнными обмотками. Для машин с катушечными обмотками диаграммы содержат чётный ряд гармоник. Путём программной перестройки задания диаграмм можно улучшить удельные показатели при изменении нагрузки машины за цикл работы. Эффективность оптимизации оценивается в 10...15%. В сочетании с оптимизацией геометрии магнитопроводов можно улучшить удельные показатели до 40%. В заключительной части главы приводится расчет и сопоставление показателей по напряжению и коэффициенту мощности.

В *пятой главе* получена и верифицирована модель расчёта потерь в стали. Это позволило оценить величину и локализацию потерь. Получены модели наблюдателей и алгоритм адаптивного регулирования угла нагрузки машин с учетом потерь в стали. Это позволило при высоких скоростях вращения увеличить удельный момент на 15...20%.

В *шестой главе* экспериментально верифицированы все математические модели, полученные в диссертационной работе. Сформулированы требования к металлургическому электроприводу, тяговому электроприводу и электроприводу с вентиляторной нагрузочной характеристикой. Предложена методика выбора электрической машины в зависимости от требований к ней, основанная на критерии Парето.

*Заключение* содержит девятнадцать общих выводов, отражающих полученные результаты.

В *приложении* приведены акты о внедрении результатов исследований на производстве и в учебный процесс энергетического направления ЮУрГУ.

## **5. Рекомендации по использованию результатов работы**

1. Результаты исследований необходимо включить в учебный процесс ВУЗов при подготовке специалистов в области электромеханики и электротехники.

2. Результаты исследований могут быть полезны при модернизации систем управления существующими электроприводами, работающими в расширенных диапазонах скоростей и моментов нагрузки.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть полезны при проектировании новых серий синхронных реактивных и индукторных электрических машин.

## **6. Замечания по диссертационной работе**

По диссертационной работе и реферату имеются следующие замечания:

- 6.1 В чём проявляется синергетический эффект системы электрическая машина – преобразователь для её питания и управления? Как это отражается в уравнениях математической модели системы?
- 6.2 Влияние учёта тепловых режимов работы при проектировании данного класса синхронных реактивных машин.
- 6.3 Обоснование выбора критериев адаптации и оптимизации при проектировании частотно-управляемых синхронных реактивных машин как специального класса электрических машин. Проблемы выхода из локальных экстремумов при решении задач минимизации целевой функции для оптимизации их конструкции и параметров.
- 6.4 При верификации предложенных математических моделей недостаточно отражено влияние синергетического эффекта. Он должен проявляться математически или структурно?
- 6.5 В чём проявляется взаимовлияние изменения геометрии и конструкции синхронных реактивных машин и совершенствование систем управления силовым преобразователем и как это влияет на их внешние характеристики.

## **7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Оценивая работу в целом, считаем, что диссертация Горожанкина Алексея Николаевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой освещены вопросы проектирования синхронных реактивных и индукторных электрических машин для расширенных диапазонов скоростей и моментов нагрузки рабочего органа. Приведенные научные результаты и выводы свидетельствуют о решении крупной актуальной научно-технической проблемы. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Приведенные замечания не являются существенными и не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой работы. Содержание диссертационной работы полностью соответствует ее названию и паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы». Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что диссертационная работа Горожанкина Алексея Николаевича полностью соответствует требованиям п. 9, п. 10, п. 11, п. 13, п. 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в части требований, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертационная работа Горожанкина А.Н. заслушана и отзыв к ней обсужден и единогласно одобрен на совместном научно-техническом собрании отделения электроэнергетики и электротехники (д.т.н., профессор Б.В. Лукутин, д.т.н., профессор С.Г. Обухов, д.т.н., профессор В.Г. Букреев, д.т.н., доцент Глазырин А.С., д.т.н., доцент Однокопылов Г.И., к.т.н., доцент Кладиев С.Н., к.т.н., доцент Тимошкин В.В., к.т.н., доцент Ляпунов Д.Ю.) и отделения автоматизации и робототехники (к.т.н., доцент Филипас А.А., к.т.н., доцент Щипков А.А.) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» 22 июня 2023 года.

Отзыв составлен:

Д.т.н., доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники

Глазырин Александр Савельевич

Д.т.н., доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники

Однокопылов Георгий Иванович

К.т.н., доцент, доцент отделения электроэнергетики и электротехники

Кладиев Сергей Николаевич

Подписи Глазырина А.С., Однокопылова Г.И. и Кладиева С.Н. заверяю:

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

адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр-т. Ленина, 30

+7 (3822) 60-63-33; +7 (3822) 60-64-44

E-mail: [tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru)



Handwritten signature of A.A. Rusakova and date 10.08.2023

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

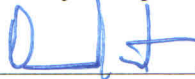
Адрес: 634050, РФ, г. Томск, пр-т Ленина, д. 30

Я, Глазырин Александр Савельевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Горожанкина А.Н. и их дальнейшую обработку.

 /А.С. Глазырин/

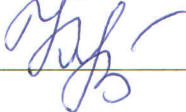
« 3 » 08 2023 г.

Я, Однокопылов Георгий Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Горожанкина А.Н. и их дальнейшую обработку.

 /Г.И. Однокопылов/

« 3 » 08 2023 г.

Я, Кладиев Сергей Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Горожанкина А.Н. и их дальнейшую обработку.

 /С.Н. Кладиев/

« 3 » 08 2023 г.



ПОДПИСЬ  
УДОСТОВЕРЯЮЩАЯ  
НАЧАЛЬНИК А. А. РУСАКОВА

*Кладиева С. Н.*

*10.08.2023*