

В диссертационный совет Д 512.002.01  
при Акционерном обществе  
«Научно-технический центр  
Федеральной сетевой компании  
Единой энергетической системы»  
(АО НТЦ ФСК ЕЭС)

### ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Ватаева Андрея Сергеевича  
на диссертационную работу Гришина Николая Васильевича  
на тему: «Расчетное и экспериментальное определение индуктивных сопротивлений  
шестифазных турбогенераторов для анализа переходных процессов», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 –  
«Электромеханика и электрические аппараты»

Оппонируемая диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка  
литературных источников из 95 наименований, списка условных обозначений, пяти  
приложений. Работа содержит 207 страниц, включая 70 рисунков и 15 таблиц.

Автореферат включает 22 страницы машинописного текста с рисунками, а также  
перечень пяти опубликованных работ соискателя.

**1. Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.09.01 –  
«Электромеханика и электрические аппараты» и установленным критериям,  
которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней**

Объектом исследования диссертации Гришина Н.В. являются шестифазные  
синхронные электрические машины, предназначенные для электромеханического  
преобразования механической энергии паровой турбины в электрическую  
(турбогенераторы). Предметом исследования являются их электромагнитные параметры, а  
также особенности протекания переходных процессов при их эксплуатации в штатных и  
анормальных режимах. В диссертации разработаны способы расчетного и  
экспериментального определения эквивалентных электромагнитных параметров,  
математическое описание и схемы замещения шестифазного турбогенератора,  
предназначенные для анализа установившихся режимов и переходных процессов,  
программная реализация математической модели, проведены расчеты различных  
переходных процессов, выполнен анализ влияния конструктивных факторов на  
электромагнитные параметры и характер протекания переходных процессов.

Все это подтверждает соответствие диссертации специальности 05.09.01 –  
«Электромеханика и электрические аппараты» (п.3.«Разработка методов анализа и синтеза  
преобразователей электрической и механической энергии» и п. 5. «Разработка подходов,  
методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих проектирование, надежность,  
контроль и диагностику функционирования электрических, электромеханических  
преобразователей и электрических аппаратов в процессе эксплуатации, в составе рабочих  
комплексов»).

Таким образом, диссертационная работа Гришина Н.В. соответствует критериям,  
установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным  
постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 (ред. от  
01.10.2018):

- по п.9 диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в  
которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития

электротехнической отрасли знаний в области исследования шестифазных турбогенераторов.

- по п.10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.
- по пп.11-13 основные научные результаты изложены в опубликованных по теме диссертационной работы 5 работах, в том числе 3 статьях, входящих в перечень ВАК. Содержание опубликованных работ в полной мере отражает содержание автореферата и диссертации.
- по п.14 в диссертации сделаны необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов.

## **2. Актуальность темы диссертации**

Развитие электроэнергетики и строительство электростанций с мощными энергоблоками сопровождается необходимостью решения комплекса задач по созданию турбогенераторов, обеспечивающих их функционирование. Одним из путей решения данной задачи является применение в составе энергоблоков предельной мощности шестифазных турбогенераторов. Наиболее остро в настоящее время стоит вопрос обеспечения надежной эксплуатации указанных электрических машин в статических и динамических режимах ввиду многообразия возможных эксплуатационных и аварийных ситуаций. Решение данного вопроса напрямую связано с исследованием как переходных процессов в таких генераторах, так и электромагнитных параметров машин, определяющих характер их протекания.

Проблема исследования переходных процессов и электромагнитных параметров трех- и шестифазных синхронных генераторов (СГ). Известны труды Ю.Г. Шакаряна, В. Я. Беспалова, Я. Б. Данилевича, Р.А. Лютера, М. П. Костенко, Г.М. Хуторецкого, Б.В. Сидельникова, А.И. Важнова, И.З. Богуславского, С.В. Смоловика, М.В. Пронина, Е.Я. Казовского, Л.Г. Мамиконянца и др. авторов, посвященные разработке и исследованию адекватных быстродействующих моделей многофазных синхронных электрических машин различной мощности и назначения, а также определения их параметров.

Совершенствование конструкции генераторов, обусловленное применением новых материалов и конструктивных решений, появление новых алгоритмов управления и полупроводниковых систем возбуждения, а также развитие средств вычислительной техники требуют выполнения новых исследований в данной области. Наиболее важным в этом отношении являются вопросы обеспечения надежности работы турбогенераторов в сложных переходных и аномальных режимах, что связано с разработкой адекватных и в то же время простых в практической реализации математических моделей, в достаточной степени учитывающих взаимное влияние трехфазных обмоток статора, образующих шестифазную обмотку. Не менее важным с практической точки зрения является использование в указанных математических моделях единого набора эквивалентных электромагнитных параметров, который доступен простому экспериментальному и теоретическому определению.

Можно согласиться с утверждениями соискателя (стр. 6-7, 23-30) о том, что в опубликованных трудах недостаточно внимания уделено вопросам исследования сложных переходных процессов и аномальных режимов, в частности комбинированных коротких замыканий, применяемые математические модели не являются универсальными и зачастую сложны вследствие одновременного использования электромагнитных параметров, зачастую нетривиальных для определения экспериментальными и расчетными методами. При этом вопросы расчетной оценки и экспериментального

исследования электромагнитных параметров, определяющих характер протекания шестифазных синхронных турбогенераторов не получили должного теоретического и практического освещения. Это затрудняет разработку рекомендаций как по проектированию турбогенераторов, так и по разработке эффективных алгоритмов управления ими, обеспечивающих высокую надежность оборудования.

В целом можно считать, что намеченные и решаемые Н.В. Гришиным задачи (стр. 8) разработки адекватной универсальной математической модели для анализа широкого спектра установившихся, переходных и аномальных режимов работы шестифазных турбогенераторов, методов определения параметров модели на основе результатов численных и экспериментальных исследований, экспериментальной апробации разработанной модели и разработки инженерной методики расчета установившихся, переходных и аномальных режимов работы шестифазного турбогенератора с применением современных программных средств являются актуальными для электромеханики и электромашиностроения.

### **3. Новизна научных положений и практическая значимость диссертации.**

Новизна представленной работы определяется в первую очередь разработанной методикой математического моделирования шестифазных турбогенераторов, позволяющей проводить исследование различных установившихся, переходных и аномальных режимов указанных электрических машин, в том числе симметричных, несимметричных, сложных комбинированных коротких замыканий с использованием универсальной математической модели. При этом соискателем предложен комплексный подход к рассмотрению переходных процессов: от разработки математической модели и её программной реализации до расчетных выражений, используемых для определения индуктивных сопротивлений экспериментальными и расчетными способами.

В качестве **новых научных результатов**, полученных лично автором, следует **выделить**:

1. Методику расчетного определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора, применяемых для анализа различных видов переходных процессов, с учетом взаимного влияния трехфазных обмоток статора, образующих шестифазную обмотку.
2. Методику экспериментального определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора, позволяющие определять с достаточной для практики точностью необходимые для математического моделирования электромагнитные параметры с учетом конструктивных особенностей мощных шестифазных турбогенераторов. При этом приведен обширный материал выполненных экспериментов.
3. Схемы замещения шестифазных турбогенераторов, использующие указанные выше индуктивные сопротивления и позволяющие выполнять анализ переходных процессов, установившихся и аномальных режимов без непосредственного решения систем дифференциальных уравнений.
4. Математическую модель шестифазного турбогенератора и его программную реализацию, позволяющие исследовать работу генераторов в установившихся, переходных и аномальных режимах.
5. Результаты численных расчетов и экспериментальных исследований переходных процессов и параметров схем замещения мощных шестифазных генераторов, полученные с использованием разработанных соискателем методик.

**Практическую значимость** диссертации определяют следующие результаты, полученные лично соискателем:

1. Разработанная соискателем методика расчетного определения параметров

схем замещения шестифазных синхронных генераторов, более полно учитывающая взаимное влияние трехфазных обмоток, образующих шестифазную статорную обмотку.

2. Разработанная соискателем методика определения параметров схем замещения шестифазных синхронных генераторов на основе результатов эксперимента при проведении промышленных испытаний шестифазных турбогенераторов на предприятии-изготовителе, а также во время пуско-наладочных работ при монтаже на электростанции.
3. Разработанные соискателем универсальная математическая модель шестифазного синхронного генератора и схемы замещения, позволяющие выполнять анализ различных установившихся, аномальных и переходных режимов без решения систем дифференциальных уравнений.
4. Разработанная методика расчета переходных и аномальных режимов работы шестифазных синхронных генераторов и ее программная реализация, более точно учитывающая влияние взаимных индуктивных связей между двумя трехфазными обмотками шестифазной обмотки статора по путям потоков рассеяния.

**4. Степень обоснованности и достоверности основных научных положений, выводов и рекомендаций диссертации** можно считать вполне достаточной, т. к. работа базируется на применении строгих методов расчета и анализа взаимосвязанных физических полей и новых компьютерных технологий. Кроме того, и это представляется важным, все методики, выводы и рекомендации диссертационной работы подтверждены результатами физического эксперимента.

**5. Анализ содержания диссертационной работы и соответствие ее требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.**

Проведенное во введении обоснование актуальности темы диссертации представляется правильным. Намеченные для решения задачи актуальны и важны для науки и практики.

В первой главе рассмотрено современное состояние теории и практики создания и численного исследования турбогенераторов с шестифазными статорными обмотками. Список литературы содержит достаточное количество отечественных и зарубежных публикаций по теме диссертации.

Во второй главе представлены дифференциальные уравнения шестифазного турбогенератора, записанные в относительных единицах в системе координат жестко связанных с ротором. Получено решение уравнений с использованием операторного метода и рассчитаны сверхпереходные, переходные и синхронные индуктивные сопротивления шестифазного турбогенератора, применимые для анализа упрощенных задач, приведены примеры аналитических расчетов токов коротких замыканий.

В третьей главе проведена систематизация электромагнитных параметров шестифазного турбогенератора, используемых для анализа переходных процессов и установившихся режимов. Предложен способ оценочного расчета составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, а также сопротивления нулевой последовательности, учитывающий конструктивных особенностей мощных шестифазных турбогенераторов. На основе сопоставления результатов расчета параметров по разработанной методике и с помощью численного расчета электромагнитного поля методом конечных элементов сделан вывод о том, что используемые в разработанной методике допущения и упрощения не приводят к значительному снижению точности

расчета и могут быть применены в инженерной практике. С использованием разработанной методики выполнен анализ влияния сокращения шага обмотки в наиболее актуальном для мощных турбогенераторов диапазоне на значения индуктивных сопротивлений обмотки статора, проведена оценка влияния отдельных составляющих рассеяния.

В четвертой главе предложены способы экспериментального определения составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора шестифазного турбогенератора преимущество которых заключается в том, что при их выполнении не требуется специальное высоковольтное оборудование, а протекающие в обмотках токи не создают опасных усилий, могущих привести к повреждению как генератора, так и измерительного оборудования. Практическую ценность результатов, изложенных в данной главе, составляют разработанные методики проведения экспериментального определения параметров в промышленных условиях.

В пятой главе представлены экспериментальные данные, полученные с использованием разработанной соискателем методики, на нескольких образцах шестифазных турбогенераторов ТЗВ-1200-2АУЗ и ТВВ-1200-2УЗ, подтверждающие достоверность выполненных расчетных оценок. На основе полученных соискателем расчетных параметров построены характеристики установившихся трех- и шестифазного коротких замыканий, а также получена зависимость напряжения на разомкнутой трехфазной системе при установившемся трехфазном коротком замыкании другой системы для обоих типов турбогенераторов от тока возбуждения.

В шестой главе представлены разработанные на основе уравнений состояния шестифазного турбогенератора схемы замещения, которые позволяют выполнять анализ различных установившихся и переходных процессов. Наглядно отображая особенности электромагнитных связей трехфазных обмоток статора, составляющих шестифазную обмотку, схемы замещения облегчают однозначную физическую трактовку протекающих в шестифазном турбогенераторе переходных процессов. На основе принципа постоянства потокосцепления разработаны также схемы замещения, содержащие сверхпереходные и переходные индуктивные сопротивления, которые могут быть использованы для оценки значений токов, электромагнитных сил и моментов в симметричных и несимметричных режимах. Одним из преимуществ разработанного соискателем метода можно считать его универсальность, поскольку при его использовании не возникает необходимости в корректировке как уравнений, описывающих режим, так и параметров схем замещения.

Седьмая глава диссертации посвящена вопросам построения рационального алгоритма для численного интегрирования представленных ранее дифференциальных уравнений шестифазного турбогенератора. Освещены вопросы уточненного учета вихревых токов в массивных элементах ротора турбогенератора с помощью многоконтурных схем замещения. Оценено влияние параметров повышающего трансформатора на характер протекания переходных процессов. В данном разделе представлены разработанные соискателем математические модели, реализованные в системе имитационного моделирования "Matlab" "Simulink", пригодные для расчета различных аварийных и эксплуатационных ситуаций. Представлены результаты расчетов переходных процессов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях, включении турбогенератора в сеть с нарушением условий точной синхронизации. Выполнен анализ результатов с точки зрения современного состояния теории электрических машин.

Заключение содержит основные научные и практические результаты выполненных численных и экспериментальных исследований.

В приложениях приведены математические выкладки, схемы шестифазной обмотки статора турбогенератора, расчетные модели шестифазного генератора, реализованные в системе имитационного моделирования “Matlab” “Simulink”, результаты расчетов переходных процессов шестифазного турбогенератора с помощью Simulink-модели.

Выводы и рекомендации в диссертации, изложенные по главам и по работе в целом, представляются обоснованными, объективно отражающими научную новизну и практическую значимость полученных результатов. Цели и задачи, сформулированные автором, были достигнуты.

Публикации соискателя по теме диссертации (3 публикации в изданиях из перечня ВАК, индексированных в базе данных РИНЦ) правильно и полностью отражают новые научные положения и результаты, изложенные в диссертации

В автореферате диссертации представлено основное содержание работы по главам, а также сведения: об актуальности работы, поставленной цели и задачах, о научной новизне, теоретической и практической значимости, апробации и публикациях по результатам проведенных исследований. Автореферат правильно и полностью отражает основные результаты исследований, приведенных в диссертационной работе.

## **6. Вопросы и замечания по содержанию диссертации**

1. При составлении уравнений состояния шестифазного турбогенератора используется классический подход электромеханики и рассмотрение электромагнитных процессов ведётся относительно основной гармонической. Каким образом учитывается влияние высших гармоник?
2. В диссертации рассмотрены турбогенераторы с шестифазными двенадцатизонными обмотками. Можно ли использовать полученные результаты для численного исследования переходных процессов в машинах с другими видами обмоток, например шестифазных шестизонных или многофазных?
3. При моделировании переходных процессов принимается допущение о постоянстве тока возбуждения турбогенератора. В реальности, при просадке напряжения статора происходит форсировка возбуждения. Необходимо указать, каким образом результаты исследования соотносятся со случаем регулирования возбуждения.
4. В диссертационной работе анализ переходных процессов производится при допущении о бесконечной магнитной проницаемости сердечника. Желательно более четко обосновать необходимость данного подхода при рассмотрении переходных процессов и оценить обусловленную его применением погрешность.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы и её общей положительной оценки.

## **7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Выводы и результаты диссертации могут быть использованы при создании и исследовании новых типов шестифазных синхронных машин, полученные соискателем результаты и разработанные методики позволяют прогнозировать развитие аварийных ситуаций и их последствия для оборудования на этапе проектирования и на этой основе разрабатывать мероприятия по конструктивному совершенствованию, повышению надежности и устойчивости работы турбогенераторов в составе как энергоблоков, так и энергосистем в целом.

Методики расчета и разработанные математические модели могут быть также полезны в учебном процессе как при обучении студентов электротехнических специальностей в рамках магистратуры, так и при подготовке кадров высшей квалификации.

**8. Заключение**

1. Автореферат и опубликованные работы соискателя правильно и полностью отражают новые научные положения и результаты, изложенные в диссертации.
2. Диссертация Гришина Николая Васильевича является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, и правильно отражает личный вклад автора в решение актуальной и практически значимой задачи по разработке способов расчетного и экспериментального определения индуктивных параметров шестифазных турбогенераторов, позволяющих с помощью соответствующей математической модели выполнять исследования различных переходных и аномальных режимов.
3. Полагаю, что диссертационная работа Гришина Николая Васильевича «Расчетное и экспериментальное определение индуктивных сопротивлений шестифазных турбогенераторов для анализа переходных процессов» отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 01.10.2018), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Официальный оппонент  
 доцент кафедры  
 «Электротехника и теплоэнергетика»  
 ФГБОУ ВО «Петербургский  
 государственный университет путей  
 сообщения Императора Александра I»,  
 кандидат технических наук



Вагаев  
 Андрей  
 Сергеевич

Ученый секретарь совета университета  
 к.т.н., доц.




О.В. Колодкин

Контактные данные:  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,  
 Адрес 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.  
 Контактный телефон 8 (812) 457-81-42  
 адрес электронной почты toe@pgups.ru

### Сведения об официальном оппоненте

диссертации Гришина Николая Васильевича «Расчетное и экспериментальное определение индуктивных сопротивлений шестифазных турбогенераторов для анализа переходных процессов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

ФИО	Ватаев Андрей Сергеевич
Ученая степень и наименование отрасли науки, научных специальностей, по которым защищена диссертация	Кандидат технических наук, 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты
Ученое звание	нет
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы, должность	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», доцент кафедры "Электротехника и теплоэнергетика"
Почтовый адрес организации	190031 г. Санкт-Петербург, Московский пр., д.9
Телефон	8 (812) 457-81-42
Адрес электронной почты	toe@pgups.ru
Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Брунман В.Е., Ватаев А.С., Волков А.Н., Волков Е.А., Петкова А.П., Кочанжи Ф.И., Плотников Д.Г. Методы повышения энергоэффективности нефтедобычи штанговыми глубинными насосами при разработке месторождений кустовым способом // Вестник машиностроения. №2. 2017. С.33-37.</li> <li>2. Брунман В.Е., Ватаев А.С., Волков А.Н., Петкова А.П., Плотников Д.Г. Повышение энергоэффективности нефтедобычи оптимизацией работы линейных приводов штанговых глубинных насосов // Вестник машиностроения. №3. 2017. С.32-36.</li> <li>3. Брунман В.Е., Ватаев А.С., Волков А.Н., Ларин М.Ю., Мацко О.Н., Петкова А.П., Плотников Д.Г. Разработка алгоритмов управления штанговыми насосами, направленных на повышение энергоэффективности// Вестник машиностроения. №4. 2017. С.24-25.</li> <li>4. Brunman V.E., Vataev A.S., Volkov A.N., Volkov E.A., Petkova A.P., Kochanzhi F.I., Plotnikov D.G. Eenergy-efficient oil extraction by sucker rod borehole pumps in low-yield fields // Russian Engineering Research. Vol.37. № 5. 2017 P.378-382.</li> </ol>



	<p>5. Brunman V.E., Vataev A.S., Volkov A.N., Petkova A.P., Plotnikov D.G. Optimizing pump-drive operation to improve the energy-efficiency of oil extraction // Russian Engineering Research. Vol. 37. №6. 2017. P.479-484.</p> <p>6. Brunman V.E., Vataev A.S., Volkov A.N., Larin M.Y., Matsko O.N., Petkova A.P., Plotnikov D.G. Improving the energy efficiency of borehole pumps // Russian Engineering Research. 37. № 7. 2017. P.579-580.</p> <p>7. Ватаев А.С., Ларионова Е.В. Сравнительный анализ алгоритмов управления асинхронным электродвигателем линейного реечного привода штангового глубинного насоса // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. 2018. С.25-27.</p> <p>8. Брунман В.Е., Ватаев А.С., Петкова А.П., Волков Е.А., Ларин М.Ю., Ларионова Е.В., Кочанжи Ф.И. Разработка принципов энергоэффективного управления группой штанговых глубинных насосов в условиях низкого дебита скважин// Наука и инновации в технических университетах материалы Одиннадцатого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2017. С.17-19.</p> <p>9. Брунман В.Е., Ватаев А.С., Волков А.Н., Петкова А.П. Методы повышения эффективности нефтедобычи низкодебитных скважин штанговыми глубинными насосами // Современное машиностроение. Наука и образование. №5. 2016. С.611-618.</p> <p>10. Ватаев А.С. Экспериментальное исследование перенапряжений в обмотке статора частотно-регулируемых асинхронных двигателей малой мощности при наличии и отсутствии ротора // Наука и инновации в технических университетах Материалы Девятого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2015. С.11-12.</p>
--	--

Официальный оппонент,  
к.т.н.



Ватаев Андрей Сергеевич

Подпись руки *Ватаева А.С.*

удостоверены

Документы отдела кадров сотрудников

*С.Е. Косовская*

20 февраля 2020 г.

