

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу Н.В. Гришина**  
**"Расчетное и экспериментальное определение индуктивных**  
**сопротивлений шестифазных турбогенераторов**  
**для анализа переходных процессов"**,  
представленной к защите на соискание степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

### **Актуальность темы диссертации**

Реализация в турбогенераторостроении мощностей 800-1200 МВт была связана с многочисленными научными исследованиями и переходом на непосредственное охлаждение обмотки статора водой, а обмотки ротора водородом, а затем и на полное непосредственное водяное охлаждение активной зоны машины. Одним из способов повышения общих показателей турбогенератора за счет улучшения электромагнитных характеристик является применение шестифазных обмоток на статоре. На практике применение шестифазных обмоток оправдано для самых мощных двухполюсных турбогенераторов, и первой такой машиной стал в 1980 г. турбогенератор ТВВ-1200-2 для Костромской ГРЭС. В настоящее время заводом "Электросила" ПАО "Силовые машины" изготовлены и вводятся в

эксплуатацию на атомных электростанциях шесть турбогенераторов типа ТЗВ-1200-2АУЗ мощностью 1200 МВт с шестифазной обмоткой статора.

В связи с вышесказанным тема диссертации Гришина Н.В. является актуальной, т.к. в ней изложены как классические и современные методы расчета, так и новые экспериментальные методы определения параметров шестиполусных турбогенераторов, апробированные в процессе проектирования турбогенераторов ТЗВ-1200-2АУЗ, а также предложена математическая модель для анализа переходных процессов в шестиполусных турбогенераторах на базе не зависящих от режима эквивалентных индуктивных сопротивлений.

#### **Достоверность и научная новизна исследования**

Обобщая и развивая существующие исследования в области шестифазных генераторов, автор научно обосновал и получил в относительных единицах уравнения состояния шестифазного турбогенератора в координатах  $d, q, 0$ , вращающихся синхронно с ротором, а также алгебраические уравнения связи потокосцеплений и токов, что позволяет исследовать широкий круг эксплуатационных и аварийных симметричных и несимметричных процессов. На основе уравнений состояния Гришиным Н.В. разработаны схемы замещения шестифазного турбогенератора, которые наглядно отображают реальные электромагнитные связи трехфазных обмоток статора, составляющих шестифазную обмотку.

Предложен способ определения с учетом конструктивных особенностей распределения шестифазной обмотки по пазам статора индуктивные сопротивления собственного и взаимного рассеяния трехфазных систем по отдельным составляющим для различных сокращений шага. Предложены экспериментальные методы определения составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, отличающиеся сравнительной простотой, удобством проведения в промышленных условиях, безопасностью для испытуемого оборудования.

Гришиным Н.В. разработаны и программно реализованы универсальные модели для расчета переходных процессов в среде MATLAB Simulink, которые позволяют анализировать токи и напряжения обмоток, частоту вращения, углы нагрузки, электромагнитные моменты в любых симметричных и несимметричных как эксплуатационных, так и аварийных режимах.

Достоверность и правильность основных положений и выводов диссертации подтверждается правильным и корректным применением теории электрических машин и методов математического моделирования, а также натурными испытаниями трех промышленных образцов турбогенераторов ТЗВ-1200-2АУЗ и турбогенератора ТВВ-1200-2УЗ.

Выводы и заключения диссертации соответствуют полученным в ней решениям.

**Практическая значимость работы** определяется тем, что результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования и производства завода "Электросила" ПАО "Силовые машины".

Материалы диссертации содержат положения, представляющие практический интерес для служб эксплуатации и ремонта турбогенераторов, а также могут быть включены в курсы подготовки специалистов высшей школы по направлению "Электроэнергетика и электротехника".

#### **Анализ содержания диссертации**

Рецензируемая работа состоит из введения, семи глав, заключения (161 страница основного текста), пяти приложений на 30 страниц и содержит 70 рисунков и 15 таблиц. Список печатных трудов соискателя включает 5 работ, опубликованных в 2013-2017 гг., в том числе 3 работы опубликованы в изданиях, включенных в список ВАК.

Во введении автор диссертационной работы убедительно обосновывает актуальность исследования двухполюсных шестифазных синхронных турбогенераторов в связи с возрастанием их использования в энергетике, четко формулирует цель, задачи и методы исследования.

В первой главе Гришин Н.В. анализирует ретроспективу проектов турбогенераторов с шестифазными обмотками, определяющим из которых является проект завода "Электросила" крупнейшего в мире двухполюсного турбогенератора ТВВ-1200-2УЗ для головного энергоблока 1200 МВт Костромской ГРЭС. Решение применить шестифазную обмотку связано с необходимостью снижения объема тока в пазу при отсутствии технической возможности для повышения статорного напряжения и сложностями применения обмотки статора с тремя или четырьмя параллельными ветвями.

Решение оказалось крайне удачным, пониженные электродинамические нагрузки, действующие на обмотку статора, позволили использовать хорошо себя зарекомендовавшие конструктивные решения по закреплению статорной обмотки, которые были разработаны для турбогенератора ТВВ-800-2УЗ. Главным конструктором д.т.н. Хуторецким Г.М. с сотрудниками была опубликована серия статей, посвященных шестифазным обмоткам, в которых рассматриваются гармонические намагничивающие силы шестифазной обмотки, индуктивное сопротивление пазового рассеяния, схемы замещения внезапного симметричного короткого замыкания из холостого хода машины, а также анализируются потери в обмотке статора и на поверхности бочки ротора от высших пространственных гармонических поля реакции якоря. Автором диссертационной работы дан подробный анализ не только этих работ, но и публикаций других российских и зарубежных исследователей. На основе выполненного анализа Гришин Н.В. формулирует вопросы, которые необходимы для рационального проектирования шестифазных обмоток, в частности – расчетное и экспериментальное определение используемых индуктивных параметров, свойственных шестифазным машинам, описание переходных процессов при произвольной нагрузке трехфазных систем, а не только симметричных режимов. В главе выбран объект исследования – двухполюсный шестифазный синхронный турбогенератор – и приняты обычные для синхронных машин допущения: бесконечная магнитная

проницаемость сердечника, симметричность магнитопровода и обмоток, синусоидальность распределения электромагнитных полей и эквивалентирование массивных элементов ротора с помощью двух сосредоточенных контуров в продольной и поперечной осях. По моему мнению, наиболее близкой к диссертации является публикация Сидельникова Б.В. и Кади-Оглы Е.Ф. [58], однако автор не выделил ее из ряда других публикаций.

В главе 2 дан подробный вывод уравнения состояния шестифазного турбогенератора в относительных единицах в координатах  $d, q, 0$ , вращающихся синхронно с ротором, а также алгебраических уравнений связи потокосцеплений и токов. Для упрощения рассмотрения режимов при различных нагрузках трехфазных систем, индуктивные сопротивления рассеяния каждой трехфазной системы представлены состоящими из двух составляющих: "собственного" рассеяния каждой системы ( $x_{\sigma 11}$  и  $x_{\sigma 22}$ ), соответствующих полям само- и взаимоиндукции фаз одной системы, и "взаимного" рассеяния  $x_{\sigma 12}$ , соответствующего взаимоиндукции трехфазных систем по путям потоков рассеяния.

Вывод, на мой взгляд, излишне подробен, а дальнейшие ссылки автора на уравнения (2.59) и (2.60) как на систему уравнений шестифазного турбогенератора не совсем корректны. В уравнениях (2.59) и (2.60) должны быть добавлены выражения для второй трехфазной системы.

Обратные преобразования для нахождения величин в фазных координатах приведены в приложении П.1. Выбор относительных единиц для шестифазного генератора, который рассматривается как эквивалентный трехфазный с базисным током  $2\sqrt{2}I_n$ , следует признать весьма удачным.

Далее уравнения шестифазного турбогенератора записаны в операторной форме, получены выражения для сверхпереходных, переходных и синхронных индуктивных сопротивлений шестифазного, и в

приложении П.5 представлены примеры аналитических расчетов токов внезапных шестифазного и трехфазного коротких замыканий.

Третья глава предлагает расчетную оценку составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, предложенную автором на основе классических представлений с учетом конструктивных особенностей распределения шестифазной обмотки по пазам статора. Допустимость используемых приближений при аналитическом рассмотрении подтверждена результатами численного расчета электромагнитного поля методом конечных элементов. Автор рассматривает весь диапазон изменения сокращения шага  $0 \leq \beta \leq 1$ , хотя практический интерес представляет диапазон  $2/3 \leq \beta \leq 1$ .

В четвертой главе рассмотрены экспериментальные методы определения составляющих индуктивного сопротивления рассеяния статора шестифазного турбогенератора. Предложено три группы экспериментов, широко используемых в практике эксплуатации трехфазных генераторов: по характеристикам установившихся режимов коротких замыканий, при удаленном индукторе, при постороннем трехфазном питании обмотки статора. Определение синхронного индуктивного сопротивления по продольной оси и индуктивного сопротивления собственного рассеяния при коротком замыкании одной трехфазной системы отличается удобством проведения в промышленных условиях и безопасностью для испытываемого оборудования. Автором сформулированы условия проведения по всем группам экспериментов, дана их оценка с точки зрения точности, трудоемкости и безопасности.

Пятая глава содержит результаты экспериментальных исследований по определению индуктивных параметров установившихся и переходных режимов на нескольких образцах шестифазных турбогенераторов. Эксперимент подтвердил достоверность предложенных способов расчетной оценки индуктивных сопротивлений и их составляющих. По расчетным

параметрам построены характеристики установившихся трех- и шестифазного коротких замыканий.

В шестой главе диссертации представлены схемы замещения для решения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности. Схемы замещения обладают наглядностью, отображают реальные электромагнитные связи трехфазных обмоток статора, составляющих шестифазную обмотку, позволяют анализировать протекающие в шестифазном турбогенераторе переходные процессы. Схемы замещения для прямой последовательности представлены для установившегося, переходного и сверхпереходного режимов. Существует российский национальный стандарт – ГОСТ Р 52735-2007 "Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ", в приложении к которому приведены схемы замещения по продольной оси шестифазного неявнополюсного синхронного генератора, трехфазные обмотки которого сдвинуты друг относительно друга на 30 эл. град. К сожалению, автор этот документ не упомянул и оценку приведенным в нем схемам не дал.

В седьмой главе Гришин Н.В. излагает способы решения уравнений состояния шестифазного турбогенератора численными методами, описывает способы определения токов и напряжений отдельных контуров. Эти способы известны, они применялись Б.В. Сидельниковым и Е.Ф. Кади-Оглы в [Л.58.], где приведена блок схема решения режимной задачи шестифазного турбогенератора и результаты расчета шестифазного и трехфазного коротких замыканий на зажимах обмоток из режима холостого хода для турбогенератора ТЗВ-1500-2. Вообще, решение уравнений состояния шестифазного генератора численными методами выполнено давно еще разработкой математической модели в виде ФОРТРАН-программ [Л.34]. Не совсем ясно, с какой целью автор описывает известный [Л.58] способ уточненного учета массивных элементов ротора, которым в дальнейшем не

пользуется. В результате расчеты электромеханических переходных процессов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях Гришин Н.В. выполнил, создав модели в одной из самых мощных матричных математических систем MATLAB с пакетом Simulink. В приложении П.4 приведено 10 различных режимов, исследованных автором, в том числе, при сохранении связи одной из трехфазных систем шестифазной обмотки с сетью, а также при комбинированных коротких замыканиях и включении на сеть.

По мнению оппонента **наиболее ценными и значимыми результатами**, полученными Гришиным Н.В., являются:

1. Расчетная оценка составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, предложенная автором на основе классических представлений с учетом конструктивных особенностей распределения шестифазной обмотки по пазам статора.

2. Экспериментальные методы определения составляющих индуктивного сопротивления рассеяния статора шестифазного турбогенератора, удобные для выполнения в промышленных условиях и безопасные для испытываемого оборудования.

3. Схемы замещения, позволяющие анализировать установившиеся и переходные процессы, оценивать значения ударных токов, электромагнитных сил и моментов.

4. Модели в среде MATLAB/Simulink для расчетов электромеханических переходных процессов в различных симметричных и несимметричных режимах, созданные на основе уравнений состояния шестифазного турбогенератора в относительных единицах в координатах  $d$ ,  $q$ ,  $0$ , вращающихся синхронно с ротором, записанных с учетом индуктивных сопротивлений, соответствующих взаимоиндукции трехфазных систем по путям потоков рассеяния.

При оценке диссертационной работы в целом следует отметить, что текст изложен хорошим литературным языком, структура отличается



продуманностью представления материала, а выводы и рекомендации – своей обоснованностью. Автореферат диссертации и опубликованные работы в достаточной мере и с необходимой полнотой отражают основное содержание работы.

### **Основные замечания по работе**

1. Ссылки автора в тексте диссертации на уравнения (2.59) и (2.60) как на систему уравнений шестифазного турбогенератора не вполне корректны. В уравнениях (2.59) и (2.60) должны быть добавлены выражения для второй трехфазной системы.

2. В диссертации при разработке схем замещения для решения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности отсутствует оценка российского национального стандарта ГОСТ Р 52735-2007 "Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ", в приложении к которому приведены схемы замещения по продольной оси шестифазного неявнополюсного синхронного генератора, трехфазные обмотки которого сдвинуты друг относительно друга на 30 эл. град. Хотелось бы услышать такую оценку при защите диссертационной работы.

3. Не совсем ясно, с какой целью автор описывает известный [Л.58] способ уточненного учета массивных элементов ротора, которым в дальнейшем не пользуется.

4. В тексте диссертации некоторые выводы, известные из классических работ, повторены излишне подробно. В первую очередь это касается главы 2 (с. 41-43 п. 2.2.2) и главы 4 (с. 77-81 п.3.2.2).

5. В работе имеются незначительные редакционные погрешности, опечатки и описки (с. 33, 42, 51, 57, 84, 153).

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

## Заключение


Диссертация Гришина Николая Васильевича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи проектирования мощных турбогенераторов с шестифазными обмотками статора, изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития отечественного электромашиностроения и энергетики, что в полной мере удовлетворяет требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842.

Диссертация соответствует специальности 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты", по которой она представлена к защите.

Автор диссертационной работы заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент  
Доктор технических наук, с.н.с.,  
в.н.с. ИХС РАН  
199034, Санкт-Петербург  
наб. Макарова, д.2  
тел.: (812) 328-16-91 E-mail: bht@mail.ru

Антипов Виктор Николаевич

  
19.02.2020

Подпись руки Антипова Виктора Николаевича  
Заверяю

И.о. зам. директора по науке ИХС РАН

к.х.н.



 А.В. Здравков

## Сведения об официальном оппоненте

ФИО	Антипов Виктор Николаевич
Ученая степень и наименование отрасли науки, специальностей, по которым защищена диссертация	Доктор технических наук, 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»
Ученое звание	Старший научный сотрудник
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы, должность	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В.Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН), ведущий научный сотрудник
Почтовый адрес организации	199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д.2
Телефон	+7 (812) 328-07-02 +7(921)4450280
Адрес электронной почты	<a href="mailto:bht@mail.ru">bht@mail.ru</a>
Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Чэн Пэн, Ли Вэйли, Ван Ликунь, Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Хань Цзичао. Исследование различных конструкций медного экрана в торцевой зоне мощного турбогенератора на основе трехмерного моделирования // Электричество. №6. 2015. С.39-46.</li> <li>2. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Преобразователи энергии волн на основе линейных синхронных генераторов мощностью 30 и 100 кВт // Энергетик. №4. 2016. С.21-25.</li> <li>3. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики // Электротехника. №2. 2017. С.8-14.</li> <li>4. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Оценка систем охлаждения высокоскоростных мини-турбогенераторов // Электричество. №6. 2017. С.36-42.</li> <li>5. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Выбор магнитных и ферромагнитных материалов для высокоскоростных мини-турбогенераторов // Электричество. №7. 2017. С.38-46.</li> <li>6. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Применение линейного программирования для эффективного проектирования высокоскоростных мини-турбогенераторов. // Энергетик. №4. 2018. С.43-46.</li> <li>7. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В.. Электрические генераторы мегаваттного диапазона мощностей для ветроэнергетики: состояние и тенденции развития // Электричество. 2019. № 8. С. 34-41</li> <li>8. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. Design and analysis of a new axial flux permanent magnet synchronous generator for wind power // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643. 012043.</li> </ol>

Официальный оппонент,  
д.т.н.

*В. Антипов*

Антипов Виктор Николаевич

Подпись руки Антипова Виктора Николаевича заверяю

И.о. зам. директора по науке ИХС РАН

к.х.н.



*Здравков*

А.В. Здравков