

На правах рукописи



Гришин Николай Васильевич

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ШЕСТИФАЗНЫХ
ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Теоретической электротехники и электромеханики»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Сидельников Борис Викторович, доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович

Официальные оппоненты:

Антипов Виктор Николаевич доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В.Гребенщикова Российской академии наук (ИХС РАН), ведущий научный сотрудник лаборатории химических проблем энергетики

Ватаев Андрей Сергеевич кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», доцент кафедры "Теоретические основы электротехники"

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Псковский государственный университет»

Защита состоится «__» _____ 2020 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 512.002.01 на базе акционерного общества «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (АО «НТЦ ФСК ЕЭС») по адресу: 115201, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 22, корп. 3, этаж 3, зал НТС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «НТЦ ФСК ЕЭС»: <http://www.ntc-power.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Новиков
Николай Леонтьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При создании энергоблоков атомных электростанций мощностью свыше 1000 МВт с быстроходными турбоустановками используют шестифазные турбогенераторы. Обмотка статора таких машин состоит из двух трехфазных обмоток со смещенными на 30 электрических градусов магнитными осями.

Для научно обоснованного проектирования и совершенствования конструкции турбогенераторов, выдерживающих аварийные ситуации, необходимо умение давать точную количественную оценку изменениям значений токов, напряжений, моментов и прогнозировать поведение машины при переходных процессах. Расчеты характеристик динамических режимов, как заданных проектом, так и исследуемых из опыта эксплуатации, имеют важное практическое значение для обеспечения и повышения работоспособности и надежности оборудования, выборе современных средств релейной защиты.

Поскольку ротор шестифазного турбогенератора идентичен ротору трехфазной машины, электромагнитные процессы в роторе протекают без каких-либо особенностей. В то же время, при различном состоянии трехфазных систем в силу их взаимного влияния шестифазные генераторы обладают рядом специфических особенностей, что приводит не только к увеличению количества электромагнитных параметров, но и усложняет физическую трактовку явлений и их математическое описание. Набор электромагнитных параметров, необходимый для рассмотрения переходных процессов, в первую очередь зависит от принятой за базу математической модели. Существующая научная проработка анализа переходных процессов шестифазных турбогенераторов сосредоточена на отдельных аспектах применения шестифазных машин, ограничиваясь рассмотрением частных случаев переходных процессов. При этом используются разнообразные математические описания, набор электромагнитных параметров которых зависит от рассматриваемых режимов. Применяемые подходы не позволяют использовать полученные результаты для расчета различных установившихся или переходных режимов, не ограничиваясь описанными. Вопросы расчетной оценки определяющих электромагнитных параметров, их экспериментального исследования, не получили должного теоретического и практического освещения в рассмотренных работах.

Приведенные соображения наряду с возрастанием использования данного класса электрических машин в энергетике показывают **актуальность** настоящей работы, направленной на рассмотрение широкого спектра переходных процессов шестифазных турбогенераторов с помощью математического описания, использующего эквивалентные индуктивные сопротивления, которые не изменяются в зависимости от рассматриваемых режимов и обладают удобством теоретического и экспериментального определения.

Целью настоящей диссертации является разработка способов расчетного и экспериментального определения индуктивных параметров, свойственных шестифазным турбогенераторам и позволяющих с помощью соответствующей математической модели выполнять анализ широкого спектра переходных процессов и установившихся режимов для обеспечения и повышения работоспособности и надежности эксплуатации данного класса электрических машин.

Для достижения этой цели требуется решение следующих конкретных **задач**:

1. Рациональное математическое описание шестифазного турбогенератора, учитывающее взаимное влияние трехфазных систем обмотки статора и использующее единый набор электромагнитных параметров для исследования различных режимов работы и переходных процессов.

2. Разработка способов расчетной оценки используемых индуктивных сопротивлений, свойственных шестифазным машинам по сравнению с традиционными трехфазными для использования в математическом моделировании переходных процессов и установившихся режимов при проектировании и совершенствовании конструкции шестифазных турбогенераторов.

3. Разработка способов экспериментального определения индуктивных сопротивлений, используемых в математическом описании состояния шестифазного турбогенератора, для их практического определения в условиях промышленных испытаний.

4. Проведение экспериментов на натуральных образцах шестифазных турбогенераторов и сопоставление экспериментальных значений индуктивных сопротивлений с расчетными для подтверждения их достоверности и правильности физического представления о протекающих явлениях.

5. Разработка на базе выработанной математической модели шестифазного турбогенератора схем замещения, наглядно отражающих электромагнитные связи

для понимания протекающих процессов и позволяющих анализировать различные установившиеся режимы и переходные процессы.

6. Разработка программной реализации математической модели шестифазного турбогенератора с применением современных средств численного интегрирования для анализа широкого круга установившихся режимов и переходных процессов, рассматриваемых при проектировании и модернизации оборудования.

Для решения поставленных задач в диссертации применен *современный аппарат научного исследования*, в состав которого входят методы *расчетно-теоретической* проработки и *экспериментальные*. В методах расчетно-теоретической проработки нашли отражение как классические (линеаризация дифференциальных уравнений, использование операционного исчисления для упрощенных решений), так и современные методы (численное моделирование путем модельно-ориентированного программирования, расчет электромагнитного поля методом конечных элементов). В работе предложены экспериментальные способы определения используемых индуктивных сопротивлений, приведены результаты испытаний и натурных экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. С учётом конструктивных особенностей шестифазных турбогенераторов получены теоретические выражения, позволяющие выполнить расчетную оценку индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора, отражающих взаимное влияние трехфазных систем, для использования в математической модели при рассмотрении установившихся режимов и переходных процессов.

2. На основе испытаний, характерных для синхронных машин, предложены способы экспериментального определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора шестифазного турбогенератора, которые позволяют практически определять необходимые для анализа переходных процессов параметры во время промышленных испытаний на заводе-изготовителе или электростанции.

3. Приведены результаты экспериментов по определению индуктивных сопротивлений шестифазного турбогенератора, выполненных во время промышленных испытаний нескольких серийных образцов оборудования, подтверждающие достоверность расчетных значений параметров и удобство применения предложенных экспериментальных способов.

4. Сформированы схемы замещения шестифазных турбогенераторов, обладающие достаточной наглядностью для физической трактовки явлений, отражающие взаимосвязь параметров машины и позволяющие анализировать переходные процессы и установившиеся режимы.

5. Разработана математическая модель шестифазного турбогенератора, позволяющая выполнять анализ широкого спектра симметричных и несимметричных переходных процессов и установившихся режимов без изменения структуры модели и набора используемых параметров. Приведены результаты численного моделирования различных симметричных и несимметричных, в том числе комбинированных переходных процессов шестифазного турбогенератора.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные выражения для расчетной оценки параметров, математические модели, схемы замещения используются при проектировании и совершенствовании конструкции мощных шестифазных турбогенераторов, анализе опыта эксплуатации и модернизации энергоблоков, использующих данные машины. Предложенные экспериментальные способы сравнительно просты и безопасны для оборудования, использовались во время промышленных испытаний. В настоящее время заводом «Электросила» ПАО «Силовые машины» изготовлены и вводятся в эксплуатацию на атомных электростанциях шесть шестифазных турбогенераторов типа ТЗВ-1200-2АУЗ мощностью 1200 МВт, при проектировании и испытаниях которых были использованы результаты работы.

Достоверность полученных результатов определяется представленным в диссертационной работе большим объемом экспериментального материала, полученного на четырёх промышленных образцах шестифазных турбогенераторов типов ТЗВ-1200-2АУЗ и ТВВ-1200-2УЗ.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Способ расчетной оценки индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора шестифазного турбогенератора, отражающих взаимное влияние трехфазных систем, для использования в математической модели при рассмотрении установившихся режимов и переходных процессов.

2. Способы и результаты экспериментального определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора шестифазного турбогенератора, которые

позволяют практически определять необходимые для анализа переходных процессов параметры.

3. Схемы замещения шестифазного турбогенератора, наглядно отражающие взаимосвязь параметров машины и позволяющие анализировать переходные процессы и установившиеся режимы.

4. Математическая модель шестифазного турбогенератора, позволяющая выполнять анализ широкого спектра переходных процессов и установившихся режимов численными методами без изменения структуры модели генератора.

Личный вклад автора состоит в определении целей, постановке задач, выборе методов их решения, проведении расчетов, подготовке и участии в экспериментальных исследованиях; обработке, обобщении и анализе полученных результатов. Все результаты, представленные в работе, выполнены лично автором. Автор благодарит за всестороннюю поддержку, содействие и помощь в проведении экспериментальных исследований сотрудников отдела проектирования турбогенераторов и испытательного центра корпуса мощных турбогенераторов завода «Электросила» ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург).

Апробация работы. По теме диссертации выполнены и обсуждены доклады на III, IV (лучшая практическая работа), V конференциях молодых специалистов ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург), на ряде заседаний Научно-Технического Совета завода «Электросила» ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург), на VII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА 2017» (г. Санкт-Петербург).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе в периодических рецензируемых российских изданиях, входящих в список ВАК - 3 работы.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация общим объемом 207 страниц состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы (95 наименований), списка условных обозначений и 5 приложений. Работа содержит 70 рисунков, 15 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные задачи диссертационного исследования и намечены направления их решения, показана актуальность и новизна диссертационной работы, её научная и практическая значимость.

В первой главе выполнен краткий анализ перспектив развития конструкций мощных турбогенераторов электрических станций. Турбогенераторы с шестифазной обмоткой статора, состоящей из двух трехфазных со смещенными в пространстве на 30 электрических градусов магнитными осями, обладают рядом достоинств в виде снижения электродинамических нагрузок, повышения использования машины, уменьшении добавочных потерь, снижения материалоемкости и простоты конструктивного исполнения. Это определило использование шестифазной обмотки статора для турбогенератора ТЗВ-1200-2АУЗ типового проекта «АЭС-2006», реализуемого на Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2, Белорусской АЭС и других.

Для традиционных трехфазных синхронных машин вопросы математического описания протекающих физических явлений, оценки изменений в режиме работы машины при переходных процессах получили достаточно глубокое теоретическое развитие в работах советских ученых А.А. Горева, А.И.Важнова, В.В. Домбровского, Е.Я. Казовского, Л.Г. Мамиконянца, Г.Н. Петрова, Я.Б. Данилевича, А.И. Вольдека, Б.В. Сидельникова и др., а также зарубежных авторов А. Блонделя, Р. Парка, Ч. Конкордия, Э. Кимбарка, Б. Адкинса, Т. Лайбля, П. Алджера и др. В то же время, применению теории синхронной машины к шестифазным турбогенераторам, работающим на блочных электростанциях, уделено весьма мало внимания. Отдельные аспекты применения шестифазных обмоток статора в турбогенераторах рассматриваются в работах Г.М. Хуторецкого, Г.Г. Воронова и других, а также зарубежных авторов У. Эль-Турки, Г. Сингха и других. Рассмотренные работы затрагивают расчеты частных случаев переходных процессов обособленных генераторов, при описании переходных процессов используются разнообразные математические модели, набор электромагнитных параметров которых зависит от рассматриваемых режимов. Данное обстоятельство не позволяет использовать полученные результаты для расчета различных установившихся или переходных режимов, не ограничиваясь описанными, производить рассмотрение явлений при сложных комбинированных коротких замыканиях. Зачастую, отсутствует единство мнений при выборе базисных величин, что не сохраняет соотношений при использовании различных теоретиче-

ских подходов. Вопросы расчетного и экспериментального определения используемых в математических моделях специфичных для шестифазных турбогенераторов индуктивных параметров не находят должного освещения.

Для математического описания шестифазного турбогенератора **во второй главе** при относительных единицах измерения сформированы уравнения состояния в осях d, q , жестко связанных с ротором. В виду наличия на статоре двух разобщенных трехфазных систем, каждая система заменяется эквивалентными продольными, поперечными контурами и токами нулевой последовательности. При выборе относительных единиц генератор рассматривается в качестве эквивалентного трехфазного: в этом случае облегчается анализ процессов в трехфазной системе с шестифазными машинами, включенными через трехобмоточный трансформатор, а параметры становятся сопоставимы с аналогичными параметрами трехфазных машин. Для сохранения соотношений между величинами за базисный ток принимается удвоенная амплитуда номинального фазного тока, базисное сопротивление статора в таком случае в два раза меньше обычно принимаемого для трехфазных машин. Для ротора используется система относительных единиц Ранкина, упрощающая запись уравнений и вид схем замещения. Для первой трехфазной системы статора и роторных контуров в относительных единицах получена следующая система уравнений (для второй системы уравнения получаются перестановкой индексов 1 и 2):

$$\begin{aligned}
 u_{d1} &= \frac{d\psi_{d1}}{d\tau} - \psi_{q1}\omega - ri_{d1}, \\
 u_{q1} &= \frac{d\psi_{q1}}{d\tau} + \psi_{d1}\omega - ri_{q1}, & \psi_{d1} &= x_{\sigma11}i_{d1} + x_{\sigma12}(i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}), \\
 u_{01} &= \frac{d\psi_{01}}{d\tau} - ri_{01}, & \psi_{q1} &= x_{\sigma11}i_{q1} + x_{\sigma12}(i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq}(i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}), \\
 u_{fd} &= \frac{d\psi_{fd}}{d\tau} + r_{fd}i_{fd}, & \psi_{01} &= x_0i_{01}, \\
 0 &= \frac{d\psi_{ed}}{d\tau} + r_{ed}i_{ed}, & \psi_{fd} &= x_{\sigma fd}i_{fd} + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}), \\
 0 &= \frac{d\psi_{eq}}{d\tau} + r_{eq}i_{eq}, & \psi_{ed} &= x_{\sigma ed}i_{ed} + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}), \\
 & & \psi_{eq} &= x_{\sigma eq}i_{eq} + x_{aq}(i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = (\psi_{d1}i_{q1} + \psi_{d2}i_{q2} - \psi_{q1}i_{d1} - \psi_{q2}i_{d2} + m_i)H_j^{-1},$$

где $u_{d1}, u_{q1}, u_{01}, u_{fd}$ - напряжения эквивалентных контуров статора первой системы и возбуждения; $i_{d1}, i_{q1}, i_{01}, i_{d2}, i_{q2}$ - токи контуров статора первой и второй систем; $i_{fd},$

i_{ed}, i_{eq} - токи возбуждения и демпферных контуров ротора; $\psi_{d1}, \psi_{q1}, \psi_{01}, \psi_{d2}, \psi_{q2}, \psi_{fd}, \psi_{ed}, \psi_{eq}$ - потокосцепления контуров первой и второй систем статора, контуров ротора; ω - угловая скорость вращения ротора; H_j - инерционная постоянная; m_t - момент турбины; $x_{ad}, x_{aq}, x_{\sigma 11}, x_{\sigma 12}, x_{\sigma fd}, x_{\sigma ed}, x_{\sigma eq}, x_0$ - индуктивные сопротивления реакции якоря в продольной и поперечной осях, собственного и взаимного рассеяния первой трехфазной системы, рассеяния обмотки возбуждения, демпферных контуров в продольной и поперечной осях, нулевой последовательности; $r, r_{fd}, r_{ed}, r_{eq}$ - активные сопротивления статора и роторных контуров.

Индуктивное сопротивление рассеяния статора представлено в виде суммы двух составляющих: $x_{\sigma 11}$, соответствующей самоиндукции и взаимоиндукции по путям потоков рассеяния фазы статора с другими фазами своей трехфазной системы, а также $x_{\sigma 12}$, соответствующей взаимоиндукции по путям потоков рассеяния с фазами другой трехфазной системы. Такое представление позволяет проследить взаимное влияние трехфазных систем и учитывать несимметрию по параметрам.

Условия симметрии или несимметрии воспроизводимых режимов определяются соотношениями между напряжениями u_{d1} и u_{d2}, u_{q1} и u_{q2} . Нулевые составляющие в фазных токах i_{01}, i_{02} могут иметь место в несимметричных режимах при выведенных нейтралях.

Предложенный подход позволяет при определенных один раз параметрах машины вести исследование различных состояний генератора, в том числе установившихся и переходных, симметричных и несимметричных, учитывать различные нагрузки в трехфазных системах, неодинаковые сопротивления ветвей блочного трансформатора и т.д.

На основе системы уравнений операторным методом получены уравнения для сверхпереходного $x''_{d(6)}$, переходного $x'_{d(6)}$ и синхронного $x_{d(6)}$ индуктивных сопротивлений шестифазного турбогенератора, позволяющие решать упрощенные задачи и проводить экспресс-анализ. В отличие от трехфазных машин данные индуктивные сопротивления зависят от распределения токов по трехфазным системам, в то же время определяющие их параметры сохраняются неизменными. При шестифазном коротком замыкании на выводах и равенстве индуктивных сопротивлений рассеяния трехфазных систем уравнения упрощаются, а в частном случае короткого замы-

кания только одной трехфазной системы сводятся к классическим, известным для трехфазной машины $x''_{d(3)}$, $x'_{d(3)}$, $x_{d(3)}$:

$$\begin{aligned} x''_{d(6)} &= x_{\sigma 11} + 2 \left[x_{\sigma 12} + \frac{x_{ad} x_{\sigma ed} x_{\sigma fd}}{x_{\sigma ed} x_{\sigma fd} + x_{ad} x_{\sigma ed} + x_{ad} x_{\sigma fd}} \right]; & x''_{d(3)} &= x_{\sigma 12} + x_{\sigma 11} + \frac{x_{ad} x_{\sigma ed} x_{\sigma fd}}{x_{\sigma ed} x_{\sigma fd} + x_{ad} x_{\sigma ed} + x_{ad} x_{\sigma fd}}; \\ x'_{d(6)} &= x_{\sigma 11} + 2 \left[x_{\sigma 12} + \frac{x_{ad} x_{\sigma fd}}{x_{ad} + x_{\sigma fd}} \right]; & x'_{d(3)} &= x_{\sigma 12} + x_{\sigma 11} + \frac{x_{ad} x_{\sigma fd}}{x_{ad} + x_{\sigma fd}}; \\ x_{d(6)} &= x_{\sigma 11} + 2[x_{\sigma 12} + x_{ad}]; & x_{d(3)} &= x_{\sigma 12} + x_{\sigma 11} + x_{ad}. \end{aligned} \quad (2)$$

Представлены примеры аналитических уравнений и расчетов токов внезапных шестифазного и трехфазного коротких замыканий шестифазных турбогенераторов.

В третьей главе получены выражения для расчетной оценки составляющих $x_{\sigma 11}$ и $x_{\sigma 12}$ рассеяния трехфазных систем, остальные используемые в математической модели параметры не отличаются от традиционных для трехфазных машин и могут рассчитываться аналогично. Указанные параметры определяются с учётом всех составляющих: пазового, по коронкам зубцов, лобового и дифференциального рассеяний для различных вариантов распределения шестифазной обмотки по пазам статора. Зависимости индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора и его составляющих от характерного для крупных машин сокращения шага представлены на рисунке 1. С увеличением $x_{\sigma 12}$ и одновременным снижением $x_{\sigma 11}$ в большей степени проявляется взаимное влияние отдельных трехфазных систем шестифазной обмотки. Однако продольное синхронное индуктивное сопротивление x_d при этом меняется не столь значительно (рисунок 2). Анализ результатов расчетов электромагнитного поля в поперечном сечении активной зоны турбогенератора методом конечных элементов подтвердил допустимость используемых приближений при аналитическом определении составляющих пазового рассеяния и по коронкам зубцов.

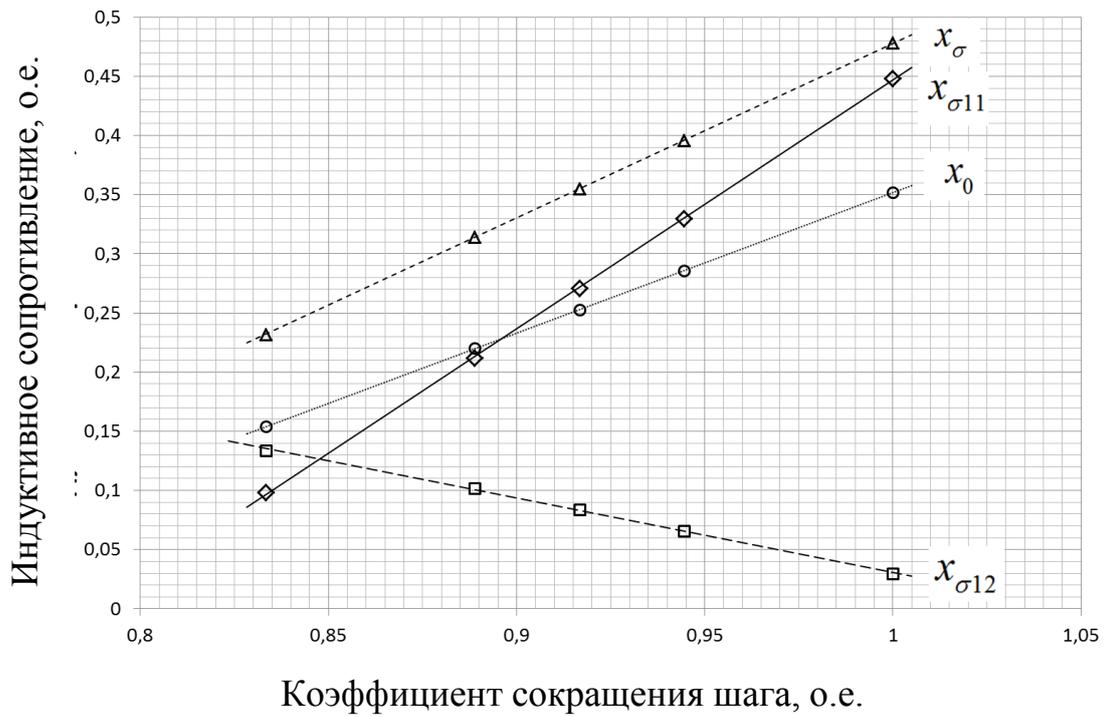


Рисунок 1 – Зависимости индуктивных сопротивлений нулевой последовательности x_0 , рассеяния статора x_σ и его составляющих $x_{\sigma 11}$, $x_{\sigma 12}$ от сокращения шага 6-фазной обмотки

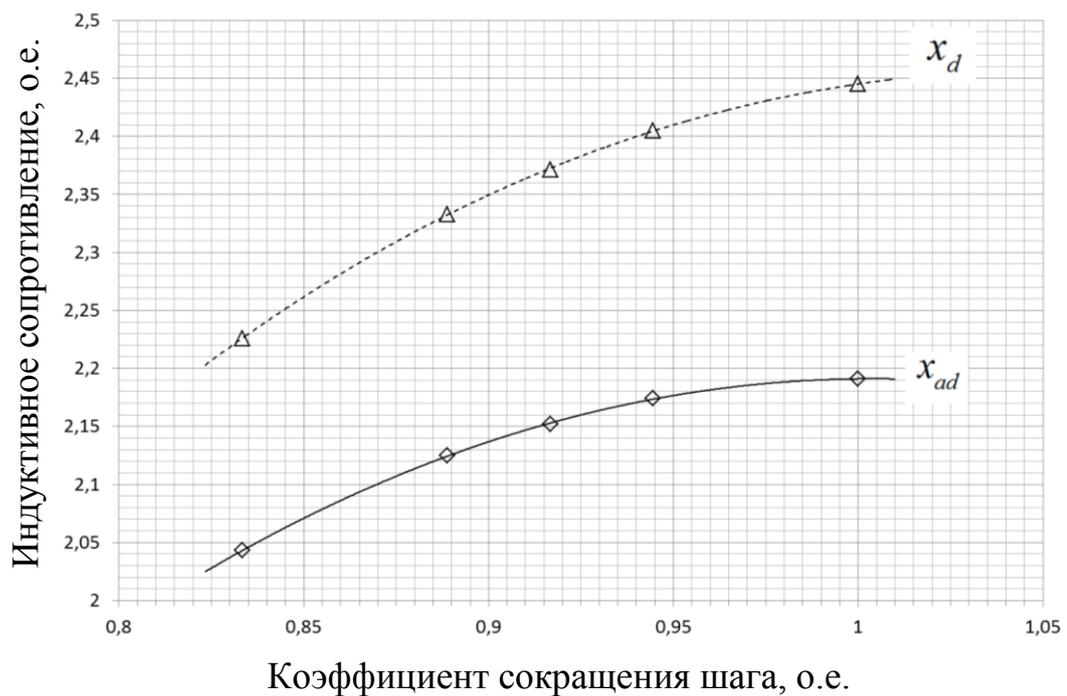


Рисунок 2 – Зависимость индуктивного сопротивления реакции якоря x_{ad} и продольного синхронного индуктивного сопротивления x_d от сокращения шага 6-фазной обмотки

Четвертая глава посвящена способам экспериментального определения составляющих $x_{\sigma 11}$ и $x_{\sigma 12}$ сопротивления рассеяния статора, остальные параметры шестифазного турбогенератора могут быть определены из обычных для синхронных машин экспериментов. Предложено три группы экспериментов.

По току установившегося трехфазного замыкания I_{k3} (А) при напряжении на открытой трехфазной системе U_2 (В) определяется:

$$x_{\sigma 11} = \frac{U_2}{I_{k3}}, \text{ Ом.} \quad (3)$$

Кроме того, этот параметр определяется через синхронные индуктивные сопротивления установившихся шестифазного короткого замыкания генератора $x_{d(6)}$ и трехфазного короткого замыкания одной системы $x_{d(3)}$:

$$x_{\sigma 11} = 2(x_{d(3)} - x_{d(6)}), \text{ Ом.} \quad (4)$$

Чтобы определять $x_{\sigma 11}$ и $x_{\sigma 12}$ проводится эксперимент по определению индуктивности рассеяния статорной обмотки при удаленном индукторе. Эксперимент можно проводить при трехфазном питании одной трехфазной системы при разомкнутой или замкнутой накоротко второй системе. При питании первой трехфазной системы (U_1 , В, I_1 , А), измеренном напряжении на разомкнутой второй U_2 (В) и сопротивлении x_b (Ом), соответствующем потоку на расточке статора, составляющие рассеяния равны:

$$x_{\sigma 12} = \frac{U_2}{I_1} - x_b, \text{ Ом,} \quad x_{\sigma 11} = \frac{U_1 - U_2}{I_1}, \text{ Ом.} \quad (5)$$

В эксперименте с короткозамкнутой второй системой, кроме параметров первой системы (U_1 , В, I_1 , А) следует измерять ток I_2 (А), наведенный во второй. В этом случае:

$$x_{\sigma 12} = \frac{U_1 I_2}{I_1^2 - I_2^2} - x_b, \text{ Ом,} \quad x_{\sigma 11} = \frac{U_1}{I_1 + I_2}, \text{ Ом.} \quad (6)$$

Эксперименты по трехфазному питанию вращающейся машины от постороннего источника (U_1 , В, I_1 , А) также позволяют определить $x_{\sigma 11}$ при измерении

напряжения на второй разомкнутой системе U_2 (В) или в случае второй замкнутой системы при измерении в ней тока I_2 (А):

$$x_{\sigma 11} = \frac{U_1 - U_2}{I_1}, \text{ Ом}, \quad x_{\sigma 11} = \frac{U_1}{I_1 + I_2}, \text{ Ом}. \quad (7)$$

В пятой главе приведены результаты экспериментов по определению индуктивных параметров шестифазных турбогенераторов. Значения синхронных индуктивных сопротивлений шестифазного короткого замыкания генератора $x_{d(6)}$ и трехфазного короткого замыкания одной системы $x_{d(3)}$, сверхпереходных $x''_{d(3)}$, переходных $x'_{d(3)}$ индуктивных сопротивлений внезапного короткого замыкания одной системы, а также индуктивные сопротивления обратной последовательности x_2 и нулевой последовательности x_0 определены на нескольких образцах генераторов ТЗВ-1200-2АУЗ и ТВВ-1200-2УЗ и соответствуют расчетным ожиданиям, сводные результаты даны в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные результаты экспериментального определения индуктивных сопротивлений шестифазных турбогенераторов

Турбогенератор	ТЗВ-1200-2АУЗ			ТВВ-1200-2УЗ		
	Значение, о.е.	Расчет, о.е.	$ \Delta $, %	Значение, о.е.	Расчет, о.е.	$ \Delta $, %
$x_{d(3)}$	2,33	2,28	2,2	2,47	2,41	2,5
$x_{d(6)}$	2,29	2,23	2,7	2,35	2,36	0,4
$x''_{d(3)}$	0,280	0,289	3,3	0,405	0,390	3,8
$x'_{d(3)}$	0,381	0,363	4,9	0,486	0,492	1,2
x_2	0,268	0,289	7,3	0,435	0,405	7,4
x_0	0,147	0,154	4,5	0,224	0,208	7,7

Предложенные эксперименты по определению составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора выполнены на трёх серийных образцах турбогенератора типа ТЗВ-1200-2АУЗ. При экспериментах получены сопоставимые значения, приведенные в таблице 2. Также в таблице приведена составляющая рассеяния $x_{\sigma 11}$, определенная для генератора ТВВ-1200-2УЗ. Отклонения расчетных

данных от экспериментальных свидетельствует об удовлетворительной для рассматриваемого круга вопросов точности. Подтверждение расчетных результатов экспериментальными данными свидетельствует о достаточной достоверности предложенных способов расчетной оценки параметров и справедливости физических представлений о явлениях, протекающих в шестифазных турбогенераторах.

По расчетным параметрам построены характеристики установившихся трех- и шестифазного коротких замыканий, а также напряжения на разомкнутой трехфазной системе при установившемся трехфазном коротком замыкании другой системы. Расчетные и экспериментальные характеристики для турбогенератора ТЗВ-1200-2АУЗ приведены на рисунке 3. Получены расчетные результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными.

Таблица 2 – Сводные результаты экспериментального определения составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора шестифазных турбогенераторов

Параметр	Способ экспериментального определения	Значение, о.е.	Расчет, о.е.	$ \Delta $, %
Турбогенератор типа ТЗВ-1200-2АУЗ				
$x_{\sigma 11}$	3-фазного короткого замыкания	0,100	0,095	5,0
	3- и 6-фазного короткого замыкания	0,091		4,4
	Удаленного индуктора при замкнутой второй трехфазной системе	0,097		2,1
	При постороннем питании и разомкнутой второй трехфазной системе	0,091		4,4
$x_{\sigma 12}$	Удаленного индуктора при разомкнутой второй трехфазной системе	0,151	0,137	9,3
	Удаленного индуктора при замкнутой второй трехфазной системе	0,153		10,5
Турбогенератор типа ТВВ-1200-2УЗ				
$x_{\sigma 11}$	3-фазного короткого замыкания	0,206	0,223	8,3
	3- и 6-фазного короткого замыкания	0,208		7,2

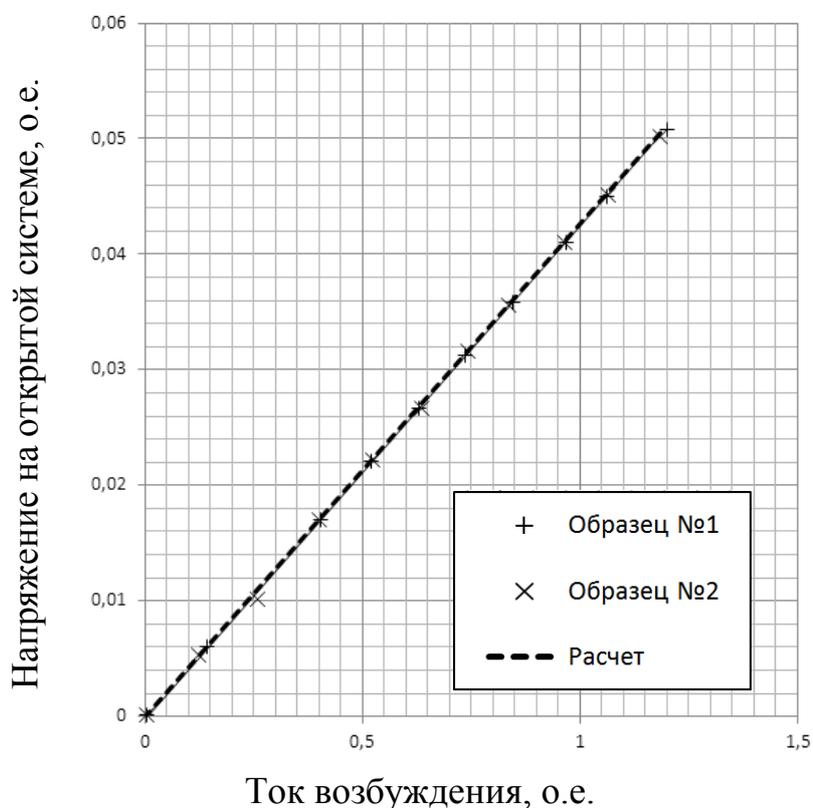
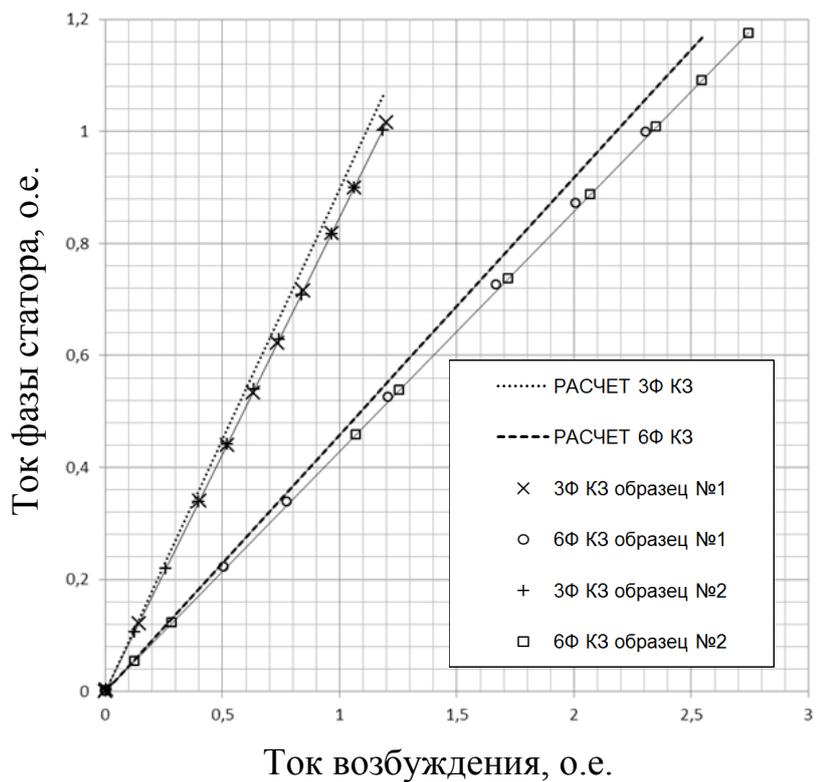


Рисунок 3 – Расчетные и экспериментальные характеристики установившихся 3-х и 6-фазного коротких замыканий и напряжение на открытой трехфазной системе при установившемся 3-фазном коротком замыкании турбогенераторов типа ТЗВ-1200-2АУЗ

В шестой главе на основе математического описания состояния шестифазного турбогенератора синтезированы схемы замещения, позволяющие анализировать установившиеся и переходные процессы при обычно принимаемых допущениях общей теории электромеханических преобразователей энергии. Схема замещения при динамических режимах по продольной оси представлена на рисунке 4. Для уравнений поперечной оси схема отличается отсутствием цепи возбуждения, напряжениями (u_{q1}, u_{q2} вместо u_{d1}, u_{d2}), параметрами (x_{aq}, x_{seq}, r_{eq} вместо x_{ad}, x_{sed}, r_{ed}), и ЭДС вращения ($\omega\psi_{d1}, \omega\psi_{d2}$ вместо $-\omega\psi_{q1}, -\omega\psi_{q2}$). Схемы позволяют использовать современные схемно-ориентированные программные продукты, не прибегая к непосредственному решению дифференциальных уравнений.

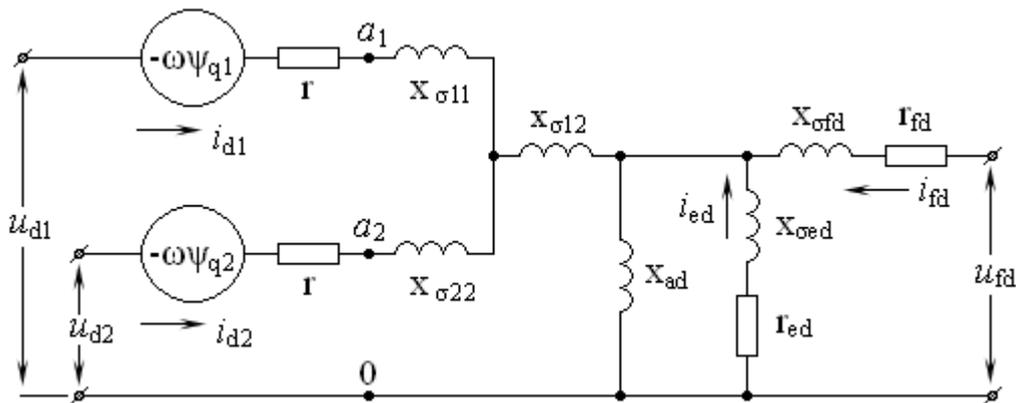


Рисунок 4 – Схема замещения по продольной оси

Второй вид схем основан на использовании принципа постоянства потокосцепления, содержит сверхпереходные x''_{d3} и переходные x'_{d3} индуктивные сопротивления и может быть полезным при оценке значений ударных токов, электромагнитных сил и моментов. На рисунке 5 приведены схемы замещения для синхронного, переходного и сверхпереходного сопротивлений. Схемы отражают связь между комплексными величинами и могут быть использованы для анализа процессов на энергоблоке «шестифазный турбогенератор-трансформатор» (рисунок 6), а также в составе более сложных схем энергосистемы. Указанные параметры $x_{d3}, x'_{d3}, x''_{d3}$ отличаются от аналогичных для трехфазных машин, потому что определяются без учета собственного рассеяния трехфазных систем $x_{\sigma 11}, x_{\sigma 22}$. Получены схемы замещения для составляющих обратной и нулевой последовательности, позволяющие использовать метод симметричных составляющих.

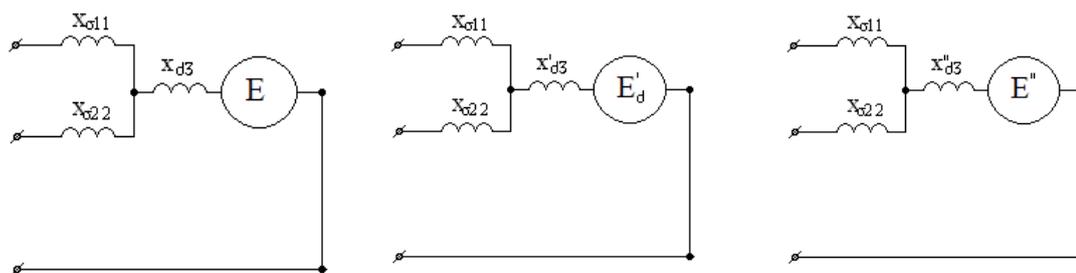


Рисунок 5 – Схема замещения шестифазного турбогенератора для синхронного, переходного и сверхпереходного сопротивлений

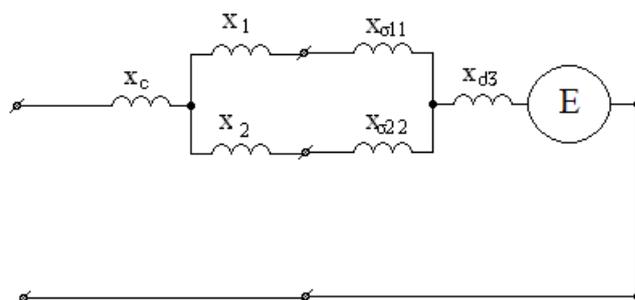


Рисунок 6 – Схема замещения энергоблока «шестифазный турбогенератор-трансформатор»

Седьмая глава посвящена способу численного решения уравнений состояния шестифазного турбогенератора. Кроме того, показаны способы уточненного учета массивных элементов ротора и учета параметров блочного трансформатора для расчетов по приведенной ранее схеме замещения энергоблока. Программная реализация в приложении Simulink программного комплекса Matlab позволяет проводить анализ широкого спектра эксплуатационных и аварийных ситуаций без изменения структуры самой модели генератора.

Выполнены расчеты внезапных шестифазных и трехфазных коротких замыканий на отдельном генераторе, результаты соответствуют аналитическому решению на основе полученных ранее операторных уравнений. Рассчитаны трехфазные и двухфазные короткие замыкания одной трехфазной системы при сохранении связи второй с сетью. Отмечено, что токи короткозамкнутой системы увеличиваются, а токи системы, включенной на сеть, способствуют увеличению всплесков токов короткого замыкания и длительности переходного процесса, что объясняется взаимным влиянием трехфазных систем. Проведены расчеты комбинированных коротких замыканий: трехфазного с переходом в шестифазное, двухфазного с переходом в трехфазное (рисунок 7).

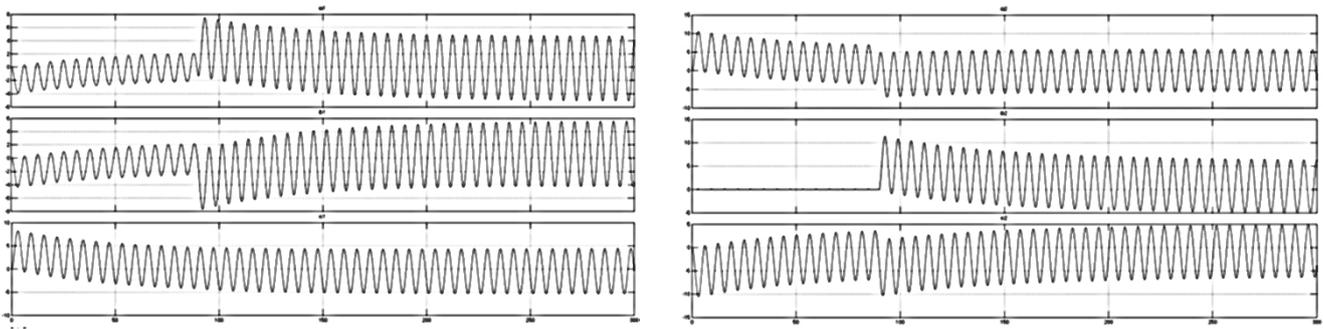


Рисунок 7 – Фазные токи статора (о.е.) при внезапном двухфазном коротком замыкании второй трехфазной системы с переходом через $\tau = 90$ рад в трехфазное, при первой включенной на сеть

Отмечено существенное влияние времени перехода одного вида короткого замыкания в другой на величины токов и электромагнитных моментов в связи с наложением аperiodических составляющих токов статорных обмоток. Выполненный анализ переходных процессов включения турбогенератора в сеть с нарушением условий точной синхронизации по напряжению, частоте, фазе подтвердил наибольшую опасность несинфазного включения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрены способы расчетного и экспериментального определения индуктивных сопротивлений, свойственных шестифазным турбогенераторам и позволяющих с помощью представленной математической модели выполнять анализ широкого круга переходных процессов и установившихся режимов данных машин для обеспечения их проектирования и модернизаций, надежной эксплуатации и повышения работоспособности. Показаны способы анализа симметричных и несимметричных, простых и комбинированных переходных процессов шестифазных турбогенераторов с предложенным набором индуктивных параметров с помощью численного и приближенного решения уравнений состояния, соответствующих схем замещения.

В работе получены следующие основные результаты.

1. Разработано математическое описание шестифазного турбогенератора, учитывающее взаимное влияние трехфазных систем обмотки статора и использующее единый набор электромагнитных параметров для исследования различных режимов работы и переходных процессов при проектировании, совершенствовании кон-

струкции и анализе опыта эксплуатации данного класса машин. В относительных единицах во вращающихся синхронно с ротором координатах получены уравнения состояния, использующие представление индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора в виде отдельных составляющих: $x_{\sigma 11}$, соответствующей самоиндукции и взаимоиндукции по путям потоков рассеяния фазы статора с другими фазами своей трехфазной системы, а также $x_{\sigma 12}$, соответствующей взаимоиндукции по путям потоков рассеяния с фазами другой трехфазной системы. Получено аналитическое решение уравнений для упрощенных задач: шестифазного и трехфазного внезапных коротких замыканий. Получены уравнения синхронного, переходного и сверхпереходного индуктивных сопротивлений шестифазного турбогенератора для решения упрощенных задач и проведения экспресс-анализа переходных процессов.

2. Предложен способ расчетной оценки составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора для использования в математическом моделировании переходных процессов и установившихся режимов при проектировании и совершенствовании конструкции шестифазных турбогенераторов. Полученные уравнения учитывают особенности конструкции шестифазной обмотки статора. Используемые приближения обеспечивают простоту и наглядность вычислений при достаточной степени точности и физической адекватности. Выполнен анализ влияния сокращения шага в наиболее актуальном для мощных турбогенераторов диапазоне на значения параметров.

3. Предложены экспериментальные способы определения составляющих индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора, используемых в математическом описании состояния шестифазного турбогенератора, для их практического определения в условиях промышленных испытаний. Способы отличаются сравнительной простотой, удобством проведения в промышленных условиях, безопасностью для испытываемого оборудования.

4. Достоверность расчетной оценки индуктивных сопротивлений подтверждена экспериментальными данными, полученными во время промышленных испытаний трёх промышленных образцов турбогенераторов ТЗВ-1200-2АУЗ, а также ТВВ-1200-2УЗ. Относительные отличия расчетных оценок от экспериментальных результатов для нескольких образцов двух типов турбогенераторов свидетельствует об удовлетворительной для рассматриваемого круга вопросов точности.

5. На основе уравнений состояния разработаны схемы замещения, позволяющие при проектировании анализировать установившиеся режимы и переходные

процессы шестифазного турбогенератора, а также на энергоблоке при учёте в схемах замещения энергоблока. Разработанные схемы замещения наглядно иллюстрируют реальные электромагнитные связи между трехфазными системами и облегчают однозначную физическую трактовку протекающих в шестифазном турбогенераторе процессов.

6. Сформулирован рациональный алгоритм и созданы математические модели в пакете Simulink программного комплекса Matlab для расчета численными методами широкого спектра как эксплуатационных, так и аварийных ситуаций без изменения структуры модели и заданных параметров шестифазного турбогенератора. Приведены расчеты переходных процессов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях, в том числе при сохранении связи одной из трехфазных систем шестифазной обмотки с сетью, а также при комбинированных коротких замыканиях и процессах включения турбогенератора в сеть с нарушением условий точной синхронизации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гришин Н.В. Анализ схем замещения шестифазных турбогенераторов в режимах коротких замыканий // Аннотации докладов III конференции молодых специалистов ПАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург, 2013. С.47.
2. Гришин Н.В. Уравнения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности. // НТВ СПбПУ. 2016. № 2 (243). С.16–23. DOI 10.5862/JEST.243.2
3. Гришин Н.В. Схемы замещения для решения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности. // НТВ СПбПУ, 2016, №2 (243). С.62-71. DOI 10.5862/JEST.243.7
4. Гришин Н.В. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора шестифазного турбогенератора предельной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 40–47. DOI: 10.18721/JEST.230403.
5. Гришин Н.В. Шестифазные турбогенераторы для атомных энергоблоков предельной мощности // Тезисы выступлений VII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА 2017», г. Санкт-Петербург, 2017. С.128-130.

Подписано в печать _____ .2020 г. Формат 60x84/16. Печать цифровая

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного автором в типографии