

Чишко

Чишко Сергей Давидович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТОРЦЕВОЙ
ЗОНЕ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в Высшей школе высоковольтной энергетики Института энергетики.

Научный руководитель: **Коровкин Николай Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Смоловик Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-технического отдела АО «НТЦ ЕЭС».

Плохов Игорь Владимирович

доктор технических наук, доцент, профессор отделения электроэнергетики, электропривода и систем автоматизации Передовой инженерной школы гибридных технологий в машиностроении Союзного государства ФГБОУ ВО «ПсковГУ».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 25 декабря 2024 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета У.2.4.1.39 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»: <https://library.spbstu.ru/ru/>

Автореферат разослан «__» ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.4.1.39
кандидат технических наук, доцент



Миневич Татьяна Геннадьевна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В связи с продолжающейся тенденцией по интенсификации нагрузок в крупных электрических машинах, в частности, наиболее высокоиспользованных из них — высокоскоростных турбогенераторах для атомных электростанций, остро стоит вопрос расчёта и анализа всех возможных режимов их работы. Более того, зачастую требуется провести расчёт полей и сил в элементах конструкций, которые в недостаточной степени рассматриваются стандартными методиками проектирования либо в силу сложности, либо в силу косвенного влияния на электромагнитные процессы и результаты основного электромагнитного расчёта.

Нетипичные режимы эксплуатации крупных генераторов, такие как резкие сбросы и набросы нагрузки, режим недовозбуждения, и поведение критически важных элементов конструкции в них требуют проведения дополнительных исследований. Одним из таких элементов конструкции является обмотка статора, подвергающаяся колоссальным электромагнитным воздействиям, особенно при переходных процессах, а проблема повышенных вибраций выводных шин вплоть до их разрушения стоит очень остро в эксплуатации как отечественных, так и зарубежных турбогенераторов большой мощности. Определение нагрузок, действующих на пазовую и лобовую часть обмотки статора, а также соединительные и выводные силы, является актуальной задачей.

Сказанное относится в большей степени к двухполюсным трёхфазным и шестифазным турбогенераторам. Над вопросом расчёта полей и нагрузок в торцевой зоне этих машин работала плеяда отечественных и зарубежных учёных и инженеров: Ю.В. Варламов, А.И. Вольдек, Я.Б. Данилевич, К.С. Демирчян, В.В. Домбровский, Л.А. Дроздова, А.В. Иванов-Смоленский, В.И. Косачевский, М.П. Костенко, В.Г. Кучинский, В.И. Милых, Л.М. Пиотровский, Р.М. Пипко, В.И. Полищук, М.Б. Ройтгарц, Г.М. Хуторецкий, В.Л. Чечурин, Р.Л. Винчестер, П. Краузе, Р. Рихтер, и многие другие.

Развитие коммерческих пакетов 3-мерного конечно-элементного моделирования электромагнитных полей позволяет смоделировать практически любой режим, но, как правило, это сопряжено с трудоёмкими и ресурсоёмкими

3-мерными вычислениями векторного потенциала, которые мало применимы на этапе предварительного проектирования или для оптимизации конструкции. При решении задач предварительного проектирования целесообразно применять упрощённые постановки задач, которые с достаточной степенью точности помогают оценить инженеру-конструктору правильность того или иного решения за приемлемое время.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы разработки методики и расчёта электромагнитных сил, действующих на пазовую, лобовую части обмотки статора, соединительные и выводные шины турбогенераторов в переходных режимах, и направлена на определение исходных данных для инженеров-механиков, что позволит обосновывать выбор крепления обмотки, обеспечивающий снижение её вибраций и увеличение надёжности в аварийных режимах. Хорошо известно, что среди средств мониторинга и защит турбогенератора важную роль играет вибрационное состояние элементов конструкции, в том числе выводных шин. Постепенное ослабление крепления шин, вызванное вибрациями в установившихся режимах, либо единичные ударные воздействия при нестационарных процессах могут привести к отключению блока по превышению вибрации, либо к авариям. В свою очередь, применение конструктивных решений для обеспечения надёжности данного узла затрудняется отсутствием методологии расчета электромагнитных нагрузок на шины в указанных режимах в практике заводов-изготовителей.

ЦЕЛЬ ДИССЕРТАЦИИ: разработка и обоснование уточнённых динамических моделей турбогенераторов с одной и двумя трёхфазными обмотками на статоре, определение распределения плотностей токов, величин и мест приложения электромагнитных сил и моментов, действующих на обмотку статора в пазовой и лобовой части, а также на соединительные и выводные шины в наиболее неблагоприятных нестационарных режимах, а также валидация применимости метода конечных элементов для задач электродинамической и тепловой устойчивости при резком нагреве токопроводящих элементов, таких как шины турбогенератора, на базе мультифизической задачи срабатывания плавкого

предохранителя, в котором происходят аналогичные процессы при нагревании от ударного тока.

Для достижения поставленной цели потребовались:

1. Анализ методов расчёта переходных процессов в синхронных машинах по схемам замещения. Разработанные модели динамических процессов трёхфазного и шестифазного турбогенератора позволили количественно оценить ударные токи в различных нестационарных режимах, а также сопоставить эти режимы по степени тяжести для машины;
2. Анализ методов расчёта полей в торцевых зонах, их допущений и ограничений. Принципиальная 3-мерность поля в торцевой зоне создает значительные сложности для её расчета, что приводит либо к большому количеству допущений для быстрой оценки, либо к существенным требованиям к вычислительным мощностям для 3-мерного конечно-элементного моделирования;
3. Актуализация методики вращающихся полей для расчёта стационарного поля в активной и торцевой зоне турбогенератора и расширение её функционала для моделирования нестационарных процессов;
4. Разработка упрощённой методики расчёта электромагнитных усилий, действующих на соединительные и выводные шины турбогенераторов, путём связи полевого решения из методики вращающихся полей и коммерческого 3-мерного пакета;
5. Расчёт усилий, действующих при внезапных набросах вращающего момента турбины, внезапных коротких замыканиях для генератора с двумя трёхфазными обмотками на статоре мощностью 1200 МВт, а также с одной обмоткой мощностью 1000 МВт, представление рекомендации по снижению максимальных нагрузок;
6. Валидация применяемого метода мультифизического конечно-элементного моделирования для задач электродинамической и тепловой устойчивости при резком нагреве токопроводящих элементов на базе разработанной модели плавкого предохранителя, в котором при срабатывании возникают высокие электромагнитные, тепловые и механические нагрузки;

7. Валидация разработанной методики по результатам подробного конечно-элементного моделирования в коммерческом пакете, а также выполнение качественного сравнения распределения усилий вдоль соединительных и выводных шин с известными основными местами поломок.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1. Выполнить анализ методов расчёта переходных процессов в синхронных машинах по схемам замещения с целью разработки моделей для определения токов в контурах турбогенераторов при различных нестационарных режимах;
2. Выполнить анализ методов расчёта полей в торцевых зонах, их допущениях и ограничениях с целью для разработки модели, позволяющей эффективно и с приемлемой точностью рассчитывать поля и силы на элементы конструкции при нестационарных процессах;
3. Актуализировать методику вращающихся полей расчёта стационарного поля в активной и торцевой зоне турбогенератора и расширить функционал для моделирования нестационарных процессов;
4. Разработать упрощённую методику расчёта электромагнитных усилий, действующих на соединительные и выводные шины турбогенераторов, путём связи полевого решения из методики вращающихся полей и коммерческого 3-мерного пакета;
5. Рассчитать усилия, действующие при внезапных набросах вращающего момента турбины, внезапных коротких замыканиях для генератора с двумя трёхфазными обмотками на статоре мощностью 1200 МВт, а также с одной обмоткой мощностью 1000 МВт, предоставить рекомендации по снижению максимальных нагрузок;
6. Разработать конечно-элементные модели для валидации применимости метода конечных элементов для анализа задач электродинамической и тепловой устойчивости при резком нагреве токопроводящих элементов, таких как шины турбогенератора, на базе мультифизической задачи

срабатывания плавкого предохранителя, в котором происходят аналогичные процессы при протекании ударного тока;

7. Разработать конечно-элементные модели торцевой зоны турбогенератора в коммерческом пакете для моделирования динамических режимов и определения сил, действующих на шины.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ: конструкция турбогенератора для атомных электростанций, конечно-элементная модель активной и торцевой зоны турбогенератора, методы численного решения уравнений электромагнитного поля.

ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ: 0-мерные модели трёхфазных и шестифазных синхронных машин на основе схем замещения, конечно-элементные модели для численного решения уравнений электромагнитного поля, результаты обработки и сопоставления расчётных данных для турбогенераторов различных исполнений.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА:

1. Разработана 0-мерная модель шестифазной синхронной машины, позволяющая оценивать токовые нагрузки при внезапных аварийных режимах;
2. Усовершенствована методика вращающихся полей для расчёта поля в турбогенераторах в нестационарных режимах;
3. Разработан комплекс программно-сценарных файлов, реализующих метод конечных элементов для расчёта сил, действующих на соединительные и выводные шины под действием поля, создаваемого шинами;
4. Реализован алгоритм нахождения результирующего поля в торцевой зоне путём суперпозиции поля из методики вращающихся полей и поля из 3-мерного расчёта собственного поля шин, получены усилия в различных аварийных режимах для мощных трёхфазных и шестифазных турбогенераторов;
5. Разработана модель срабатывания плавкого предохранителя для валидации применимости метода конечных элементов для задач, в которых при протекании ударного тока происходят электродинамические и тепловые процессы, аналогичные процессам в шинах генератора;

6. Разработаны 2-мерная модель поперечного сечения и 3-мерная модель торцевой зоны шестифазного турбогенератора в коммерческом пакете для валидации разработанной методики в части определения сил, действующих на пазовую часть обмотки в номинальном режиме и шины при внезапном коротком замыкании.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ: предложен новый подход к расчёту электромагнитных нагрузок на торцевую зону электрических машин, выполнена его апробация для турбогенераторов и подтверждена возможность эффективного использования метода без больших вычислительных затрат для задач оптимизации конструкции торцевой зоны с целью улучшения вибрационного состояния и надёжности.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ: созданы модели для определения токовых нагрузок в шестифазных машинах при аварийных ситуациях. Предложенные и реализованные усовершенствования методики вращающихся полей для расчёта поля в активной и торцевой зоне турбогенератора, позволили расширить применимость методики для расчёта нестационарных режимов.

Создан комплекс программных сценарных файлов для интеграции с расчётным модулем МКЭ, проведения анализа полученных результатов. В отличие от уже имеющихся методик прямого моделирования переходного процесса в торцевой зоне осуществлена возможность расчёта усилий на шины на основе метода, не требующего значительных вычислительных мощностей.

Получены усилия, действующие на элементы конструкции генераторов, позволяющие задавать нагрузки для механических расчётов мощных турбогенераторов с одной и двумя трёхфазными обмотками на статоре.

Результаты выполненного исследования позволяют учитывать аспекты механического состояния соединительных и выводных шин в торцевой зоне на этапе проектирования новых конструкций. Данные о силах, действующих на шины при ударных нестационарных воздействиях, позволят провести расчет рационального и эффективного их закрепления с целью увеличения надёжности системы.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. 0-мерная модель расчёта аварийных режимов в шестифазном турбогенераторе, позволившая рассчитать токовые нагрузки на обмотки, используемые как входные данные для методики вращающихся полей;
2. конечно-элементная модель турбогенератора в методике вращающихся полей, позволяющая рассчитать поля и нагрузки на обмотку в пазовой и лобовой части в нестационарных режимах, позволяющая определять места приложения и величины сил, действующих на пазовые и лобовые части обмотки статора турбогенератора;
3. комплекс программных сценарных файлов, реализующих 3-мерный расчёт МКЭ, позволивший автоматизировать процесс расчёта усилий на шины за счёт собственного магнитного поля;
4. методика определения суммарных воздействий на обмотку и соединительные шины турбогенераторов в переходных режимах;
5. расчёты сил в турбогенераторах с одной трёхфазной обмоткой мощностью 1000 МВт и с двумя трёхфазными обмотками мощностью 1200 МВт в различных режимах;
6. конечно-элементные модели плавкого предохранителя для проведения валидации применяемого метода;
7. конечно-элементные модели турбогенератора для проведения валидации полученных по разработанной методике результатов.

СООТВЕТСТВИЕ ПАСПОРТУ СПЕЦИАЛЬНОСТИ: диссертация соответствует специальности 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника. Полученные в работе научные результаты соответствуют п. 1 «Экспериментальные и расчётные исследования слабых и сильных электромагнитных полей в электротехнических, электроэнергетических, электрофизических, информационных, управляющих и биологических системах», п. 2 «Экспериментальные и расчётные исследования электрических, электронных и магнитных цепей» паспорта специальности.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ: по теме диссертации выполнен доклад на XIII съезде по теоретической и прикладной механике (г. Санкт-Петербург), материал в виде

статьи на английском языке опубликован в журнале IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

ПУБЛИКАЦИИ: по теме диссертации опубликовано четыре печатные работы, две в периодических рецензируемых российских изданиях, входящих в список ВАК по научной специальности 2.4.1. и две в журналах, входящих в наукометрическую базу данных Scopus.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА: положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

ОРГАНИЗАЦИИ, ПРЕДПРИЯТИЯ, ЗАИНТЕРЕСОВАННЫЕ В РЕЗУЛЬТАТАХ РАБОТЫ: АО «Силовые машины», НПО «ЭЛСИБ» ПАО, ООО «Электротяжмаш-Привод».

СВЯЗЬ С ПРОЕКТАМИ: Часть диссертационной работы выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Технологические вызовы и социально-экономическая трансформация в условиях зеленых переходов» (Соглашение № 075-15-2022-1136 от 01.07.2022).

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ: комплексная платформа ANSYS Electronics Desktop с расчётным модулем Maxwell, ELCUT, COMSOL Multiphysics и The MathWorks Matlab.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ: диссертация общим объёмом 133 страницы состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (113 наименований). Работа содержит 57 рисунков и 18 таблиц.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведён анализ известных методов исследования нестационарных процессов в турбогенераторах. Разработана компьютерная модель расчёта переходных процессов в мощных турбогенераторах с одной и двумя трёхфазными обмотками на статоре. Выполнен расчёт токов в обмотках турбогенератора для внезапных коротких замыканий и режимов наброса нагрузки.

Переходные процессы в электрических машинах возникают при нарушении установившегося режима работы. Переходные (неустановившиеся) процессы могут присутствовать как при нормальной работе машин (разгоны, торможение, изменение нагрузки), так и происходить в аварийных ситуациях (внезапные короткие замыкания, обрывы фаз, перенапряжения).

Как правило, переходные процессы быстротечны, но оказывают существенное влияние на работу машины. Всплески токов, напряжений, моментов, сил при переходных процессах во многом определяют требования к конструкции электрических машин. При внезапных коротких замыканиях турбогенераторов большой мощности обмотка статора, в частности её лобовые части, испытывает колоссальные усилия. На фундамент передаются пульсационные моменты в несколько раз превышающие величину номинального момента. Эти процессы сопровождаются локальными перегревами элементов конструкции за счёт повышенной мощности тепловыделения.

Теория синхронных машин в основном была разработана немецкими и американскими учёными: Р. Догерти, Л. Дрейфусом, Ч. Конкордиа, А. Ранкиным, Р. Парком и др. В развитие теории и разработку новых методов большой вклад внесли советские учёные: А.И. Важнов, А.А. Горев, М.П. Костенко, Р.А. Лютер, Л.Г. Мамиконянц, И.М. Постников и др.

В главе решается задача разработки моделей для определения токов в контурах турбогенераторов при различных нестационарных режимах при расчёте переходных процессов в синхронных машинах по схемам замещения. Полученные зависимости токов от времени в исследуемых нестационарных процессах используются как источники поля для последующего конечно-элементного моделирования электромагнитного поля в турбогенераторе.

Расчёт динамических процессов в турбогенераторах проведён в пакете 0-мерного моделирования. Существуют два способа описать поведение электрической машины в таких пакетах: решение системы дифференциальных уравнений синхронной машины в $DQ0$ координатах, либо использованием массива данных коэнергии машины как функции от положения ротора и электрических нагрузок, предварительно определённой при помощи МКЭ. Модель на базе коэнергии позволяет более точно учесть влияние геометрии активной части и локального насыщения на поведение машины ценой длительного времени подготовки требуемого массива данных, применительного только к данному конкретному исполнению турбогенератора. Модель на базе эквивалентных схем более универсальна, требует меньше входных данных о машине, в связи с этим используется в работе.

Были созданы модели турбогенераторов с одной и двумя обмотками на статоре для проведения динамических расчётов. Модели основаны на уравнениях в $DQ0$ координатах в широко используемой системе относительных единиц «*Xad*». Модели реализованы в пакете 0-мерного моделирования.

В отличие от широко используемой динамической модели турбогенератора с одной обмоткой на статоре, модель турбогенератора с двумя обмотками редко присутствует в библиотеках готовых моделей 0-мерных пакетов. Разработанная в настоящей работе модель с инженерной точностью воспроизводит основные режимы (номинальная нагрузка, короткое замыкание), что подтверждает работоспособность модели.

На рисунке 1 продемонстрированы результаты моделирования зависимостей тока в фазах шестифазного турбогенератора от времени при внезапном трёхфазном коротком замыкании, при этом кратности ударных токов имеют инженерное совпадение с известными данными натурных испытаний. При переходе от ненасыщенных к насыщенным значениям сверхпереходных сопротивлений исследуемого турбогенератора расхождение результатов снизилось.

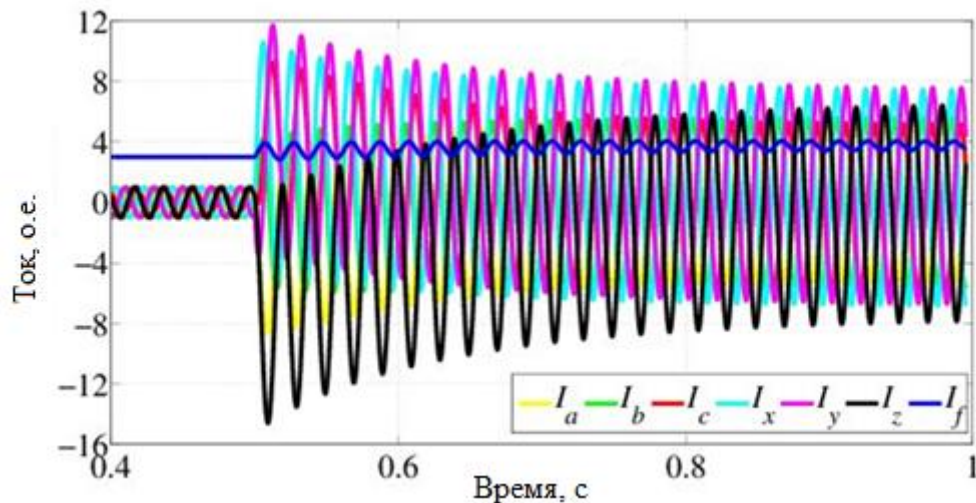


Рисунок 1 – Фазные токи и ток возбуждения шестифазного турбогенератора при внезапном трёхфазном коротком замыкании

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ представлена методика вращающихся полей, применяемая для расчёта электромагнитных нагрузок в активной и торцевой зоне турбогенераторов в установившихся режимах.

В главе решаются две задачи. Во-первых, выполнен обзор методов расчёта полей в торцевых зонах, их допущениях и ограничениях с целью для разработки модели, позволяющей эффективно и с приемлемой точностью рассчитывать поля и силы на элементы конструкции при нестационарных процессах. Во-вторых, актуализирована методика вращающихся полей для расчёта стационарного поля в активной и торцевой зоне турбогенератора и расширен её функционал для моделирования нестационарных процессов.

Предложены, обоснованы и реализованы дополнения в методику, позволяющие с достаточной точностью при небольших затратах вычислительных мощностей определять величины электромагнитных сил, действующих на пазовую

и лобовую часть обмотки статора в нестационарных режимах, используя зависимости токов от времени в контурах турбогенератора при динамических процессах в качестве источников поля при решении электромагнитной задачи. Для турбогенераторов 1000 МВт и 1200 МВт выполнен расчёт номинального режима, а также магнитных полей и электромагнитных сил в переходных режимах, таких как наброс нагрузки, внезапные шести-, трёх- и двухфазные короткие замыкания.

Задача расчёта электромагнитного поля, вихревых токов и потерь в торцевой зоне турбогенератора весьма сложна. Это объясняется сложностью геометрии лобовых частей обмоток и развитой геометрией магнитных и немагнитных тел, находящихся в торцевой зоне. На практике находят применение различные способы решения поставленной задачи, такие как применение методов интегральных уравнений, уравнений в частных производных, использующих либо метод сеток, либо метод конечных элементов, а также сведения задачи к цепной постановке. Выбор метода решения диктуется как самой задачей, так и субъективными факторами, связанными с опытом работы и знаниями особенностей метода расчёта, наличием программ и вычислительных ресурсов. На протяжении многих лет кафедра ТОЭ Политехнического института проводила электромагнитные расчёты на основе решения дифференциальных уравнений поля численными методами. Накопленный значительный опыт расчета электромагнитных полей, полученные хорошие результаты по ряду выполненных работ, а также широкая апробация разработанных подходов позволяет принять за основу эту модель. Развитие математического аппарата для расчёта магнитного поля в торцевой зоне связано с такими учёными и инженерами как: А.И. Важнов, А.И. Вольдек, И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич, К.С. Демирчян, В.В. Домбровский, В.И. Косачевский, Р.М. Пипко, М.Б. Ройтгарц, В.Л. Чечурин и др.

Расчёт электродинамических усилий в настоящей работе выполняется на основе комплекса программ, разработанных совместно ФГАОУ ВО «СПбПУ» и ПАО «Силовые машины», для расчёта электромагнитных полей, потерь и сил в торцевых зонах турбогенераторов при работе их в стационарных режимах (далее

методика вращающихся полей) использовалась Ревизия №6 данного пакета программ, также называемая «Статика».

Необходимым условием для использования пакета является допущение о периодичности электромагнитного поля турбогенератора по окружной координате в плоскости поперечного сечения. Расположение обмотки статора в пазах статора, обмотки ротора в пазах ротора, соединения стержней обмотки статора в лобовой части соответствуют данному допущению. Однако, принципиально 3-мерные элементы, такие как соединительные и выводные шины, смоделировать в указанном пакете не представляется возможным.

В качестве входных данных в программу «Статика» передается информация о конечно-элементной сетке и метках блоков, о конструкции турбогенератора, свойствах используемых материалов для меток, а также параметры исследуемого режима. Результатом расчёта программы является массив поля в зависимости от пространственной координаты. Кроме того, пакет позволяет проводить интегральные оценки на основе обработки полей.

На основе пакета «Статика» для исследуемых генераторов выполнены расчёты номинальных режимов работы, что позволяет определить базисные нагрузки, действующие на пазовую и лобовую часть обмотки статора в установившемся режиме. Для обеспечения возможности расчёта сил в динамике потребовалась доработка указанного пакета программ «Статика» с учётом изложенного ниже:

1. Изменен формат ввода данных для возможности принимать зависимости токов в контурах турбогенератора от времени.
2. Предложен и обоснован способ учета эквивалентных демпфирующих контуров ротора и задания тока в них.
3. Реализован способ сокращения расчетного времени режима при помощи инициализации магнитного состояния системы с прошлого шага по времени

взамен нулевой инициализации, что обеспечивает более быструю сходимость.

4. Реализованы функции для проведения постпроцессинга полученных массивов полей для определения максимальных сил при нестационарных процессах, а также экспорта массива поля по заданным координатам и временным интервалам.

Указанные дополнения, внесённые в пакет программ «Статика» в рамках выполненной работы позволяют определять поля и силы в нестационарных процессах при задании токовых нагрузок как функций времени при обозначенных и обоснованных допущениях. Данный пакет получил название Ревизии №7 «Динамика». Получены картины магнитных полей, а также кривые сил, действующих на пазовую и лобовую часть обмотки статора в нестационарных режимах для мощных турбогенераторов с одной и двумя трёхфазными обмотками, как показано на рисунке 2 и рисунке 3.

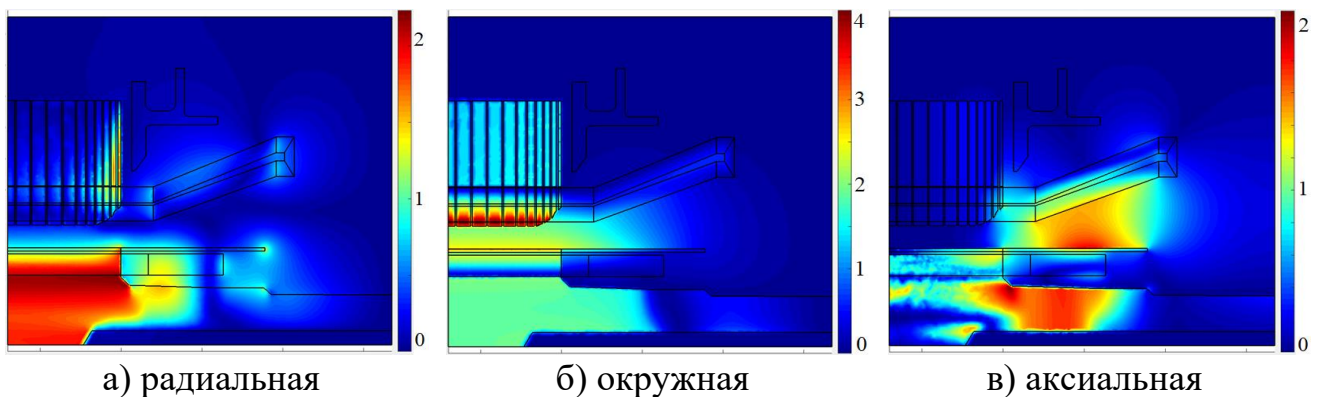


Рисунок 2 – Распределения максимальных компонент (r , ϕ , z) индукции магнитного поля при внезапном шестифазном коротком замыкании

На примере указанных типов генераторов проведены динамические расчёты коротких замыканий и процессы наброса момента на валу генератора для различных скоростей и кратностей его изменения. Определены ударные значения токов и моментов, действующих на фундамент и опорную конструкцию машины.

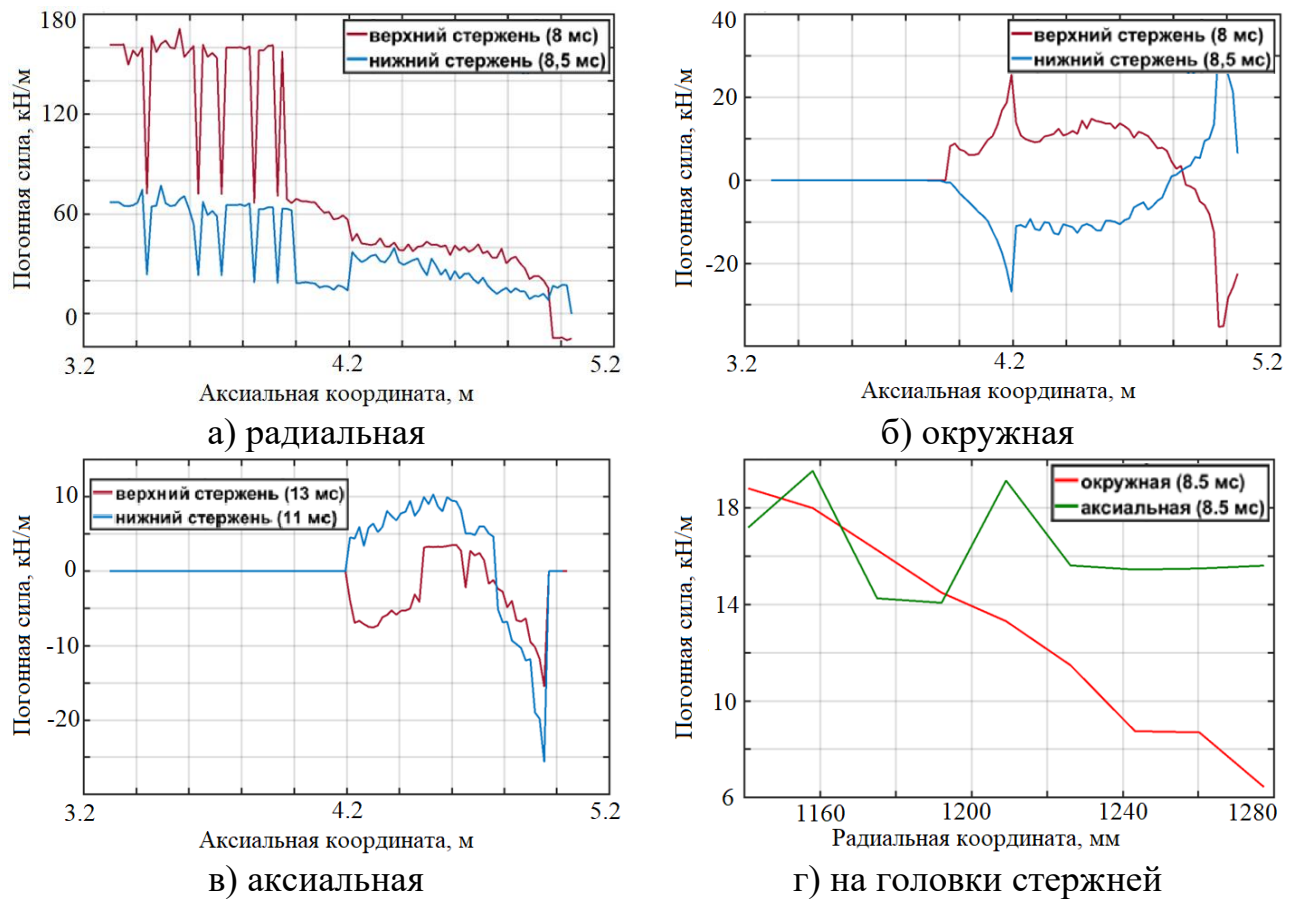


Рисунок 3 – Максимальные погонные силы при внезапном шестифазном коротком замыкании

Анализ проведённых расчётов показывает, что наибольшие электромагнитные силы возникают в режимах внезапных полнофазных (трёх- и шестифазных) коротких замыканий из номинального режима. При этом на обмотку могут действовать силы, превышающие силы в номинальном режиме в несколько десятков раз. Данные режимы относятся к категории аварийных (тем более из номинального режима) и единичных. Поэтому в целесообразно выполнить расчёт статической прочности элементов обмотки статора под действием электромагнитных сил при коротких замыканиях.

Предварительные расчёты показали, что процесс сброса момента на валу не характеризуется превышением электромагнитных сил над значениями в номинальном режиме. Однако, учитывая возможность многократного сброса за время эксплуатации (цикличности нагрузки), требуется более подробный анализ с привлечением механических расчётов для обоснования указанного заключения.

Расчёты показали, что при набросе момента на валу, на элементы обмотки действуют силы, в несколько раз превышающие номинальные. Учитывая возможность многократного наброса момента за весь срок эксплуатации турбогенератора, целесообразно в рамках дальнейшей работы по данному направлению оценить усталостную прочность элементов конструкции турбогенераторов под действием указанных нагрузок с привлечением механических расчётов.

Разработанный в работе подход к определению сил, действующих на пазовую и лобовую часть обмотки статора в нестационарных режимах, позволяет проводить расчеты поля с достаточной точностью за минуты в сравнении с часами и днями, которые требуются для расчета нестационарного процесса в 3-мерной конечно-элементной постановке в коммерческом программном обеспечении. С одной стороны, пакет «Динамика» не так удобен для освоения и препроцессинга задачи, но с другой стороны, расчет торцевой зоны выполняется на порядки быстрее, так как по сути своей это 2-мерный расчет поля.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ предложена, обоснована и реализована методика расчёта электромагнитных сил, действующих на соединительные и выводные шины мощных турбогенераторов.

В главе решаются две задачи. Во-первых, разрабатывается упрощённая методика расчёта электромагнитных усилий, действующих на соединительные и выводные шины турбогенераторов, путём связи полевого решения из методики вращающихся полей и коммерческого 3-мерного пакета. Во-вторых, выполняется расчет усилий, действующих при внезапных набросах вращающего момента турбины, внезапных коротких замыканиях для генератора с двумя трёхфазными обмотками на статоре мощностью 1200 МВт, а также с одной обмоткой мощностью 1000 МВт, представляются рекомендации по снижению максимальных нагрузок в таких режимах. Данные об электромагнитных воздействиях на шины турбогенератора позволят принимать решения о требуемых изменениях в конструктиве для повышения надежности машин.

Выполнен расчёт поля в зоне шин, создаваемого шинами, в коммерческом пакете МКЭ моделирования, а затем использован принцип суперпозиции для определения результирующего поля в зоне шин добавлением основного поля от ротора и статора. Выполнен расчёт сил, действующих на шины мощных турбогенераторов, и выполнено сравнение сил на обмотку трёхфазных и шестифазных турбогенераторов.

Задача определения сил, действующих на соединительные и выводные шины обмотки статора, является принципиально 3-мерной. Подробное моделирование торцевой зоны целесообразно осуществлять в финальном поверочном расчёте спроектированной конструкции, в итерационном процессе проектирования желательно иметь более быстрый способ оценки влияния того или иного решения на величину сил.

Для решения данной задачи предложен подход по определению сил, действующих на шины, путём комбинирования результатов расчёта поля в пакете «Динамика» и коммерческого МКЭ пакета, в котором моделируются только сами шины, как показано на рисунке 4, что позволило снизить время расчёта поля на порядок при одновременном снижении требования к вычислительным ресурсам, позволяя проводить расчет типовых персональных компьютерах инженеров по расчетам.

Учёт вихревых токов в медных экранах и шинах снижает максимальные значения погонных сил. Это связано с природой вихревых токов, стремящихся ослабить инцидентное поле, а следовательно, и величину силы Лоренца. При этом погрешность расчёта сил без учёта влияния вихревых токов находится в диапазоне 10% для проанализированных случаев. При этом учет вихревых токов в несколько раз увеличивает время, требуемое на расчет. Сделан вывод, что при консервативной оценке максимальных сил влиянием вихревых токов можно пренебречь.

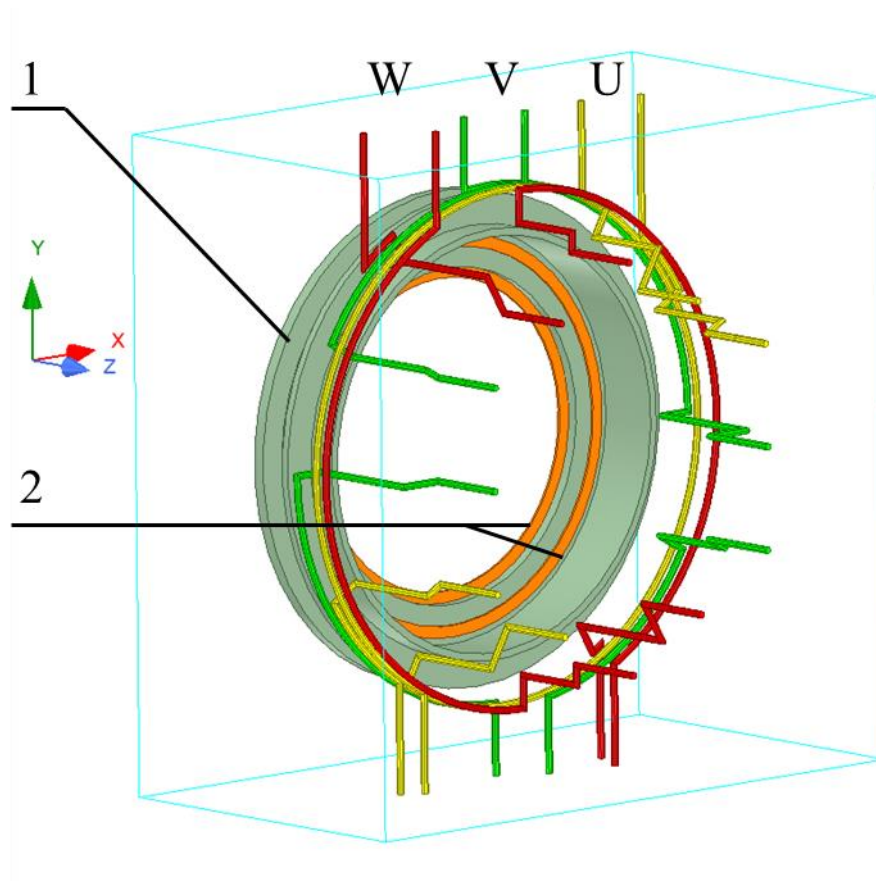
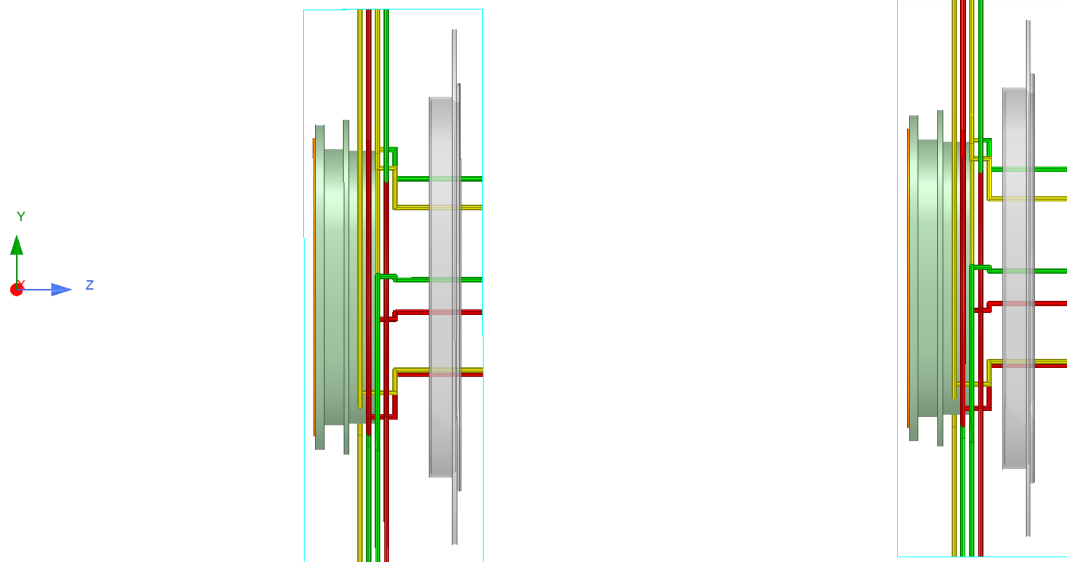


Рисунок 4 – Геометрия модели турбогенератора 1200 МВт, где представлена расчётная область, нажимная плита (1), медные экраны (2) и шины трёх фаз U, V, W обмотки со стороны возбuditеля

На модельной задаче проанализировано влияние на величину сил, действующих на шины, наличия в близости от шин ферромагнитного конструктивного элемента статора, показанного на рисунке 5. Как следует из результатов, даже существенное приближение данного элемента к шинам слабо влияет на величину сил. При этом не исследовалась величина потерь в ферромагнитном элементе.

Полученные при расчете величины погонных сил, действующих на шины, сопоставимы с погонными силами, действующими на лобовые части обмотки статора. Исходя из этого представляется возможным два подхода к снижению сил, действующих на шины. Первый – это размещение шин в зоне более слабого поля рассеяния, что приведет к увеличению размеров машины. Вторым подходом предполагается ограничить величину ударных токов при нестационарных процессах, что означает необходимость увеличения сверхпереходных индуктивностей.



а) Модель с магнитопроводящим элементом корпуса

б) Модель, в которой элемент корпуса размещен на 200 мм по оси Z ближе к шинному кольцу

Рисунок 5 – Модели для сравнения сил от собственного поля, действующих на шины турбогенератора при внезапном трёхфазном коротком замыкании

Так, ударные воздействия на элементы обмотки, находящиеся в воздухе, пропорциональны квадрату ударного тока. Ударные воздействия на прямолинейные участки стержней, в основном расположенные в пазах, имеют иную зависимость от величины тока за счет нелинейной магнитопроводности статора. В абсолютном выражении в турбогенераторе 1200 МВт при нестационарных процессах ударные величины погонных сил значительно ниже, чем в турбогенераторе 1000 МВт.

Важным представляется сравнение погонных сил на обмотку турбогенераторов в номинальном режиме. Здесь явно прослеживается зависимость от величины номинального тока. Так на всех исследуемых зонах погонные силы в турбогенераторе 1200 МВт значительно ниже, чем в 1000 МВт.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ решается задача по разработке конечно-элементной модели торцевой зоны турбогенератора для моделирования динамических режимов и определения сил, действующих на шины.

На базе разработанной мультифизической модели срабатывания плавкого предохранителя выполнена валидация применимости конечно-элементного

моделирования для анализа процессов в шинах турбогенератора на основе близких по проблематике задач, связанных с ударными электромагнитными, тепловыми и механическими усилиями при протекании ударного тока.

Разработана 2-мерная конечно-элементная модель поперечного сечения для номинального режима и 3-мерная конечно-элементная модель торцевой зоны шестифазного турбогенератора для валидации положений, полученных в третьей главе. Выполнен расчёт сил, действующих на шины при внезапном трехфазном коротком замыкании, и проведено сравнение с результатами разработанной методики.

Сначала в 2-мерной постановке номинального режима валидирована правильность задания параметров модели. На базе модели подтверждена корректность задания свойств материалов и угла нагрузки машины, так как при номинальном токе, напряжении и коэффициенте мощности модель выдает номинальную мощность. Силы, действующие на пазовую часть обмотки статора в номинальном режиме, посчитанные в пакете «Динамика» и коммерческом пакете, совпадают с расхождением менее 10%, как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Валидация на основе разработанной 2-мерной модели

	Пакет «Динамика»	Коммерческий пакет
Линейное напряжение, кВ	24,0	24,1
Фазный ток, кА	16,0	15,9
Коэффициент мощности	0,90	0,90
Активная мощность, МВт	1200,0	1200,7
Максимальная сила на верхний стержень пазовой части обмотки, кН	60,0	54,7
Максимальная сила на нижний стержень пазовой части обмотки, кН	21,0	19,2

Затем выполнено моделирование торцевой зоны турбогенератора в 3-мерной постановке, показанной на рисунке 6. Модель содержит статор и ротор, которые в данном расчёте имеют линейную относительную магнитопроводность, равную 1000 и 100, соответственно. Обмотки статора и ротора имеют распределение по пазам и число витков в соответствии с обмоточной запиской. В модели не

учитываются эффекты наведённых токов в бочке ротора, клиньях и экранах для быстрого действия и в силу принятого допущения о малом их влиянии на силы, действующие на шины. Источниками поля в модели являются зависимости токов статора и ротора от времени для исследуемого переходного процесса, задаваемые на гранях обмоток, лежащих на границах расчётной области.

Результаты расчёта в большой степени зависят от качества сеточного разбиения. Особое внимание уделено сетке в зоне воздушного зазора и вблизи шин. Различие в характерных размерах торцевой зоны и отдельных элементах, таких как диаметр шины, влечёт за собой увеличение требуемого количества элементов. Сетка, используемая для вычисления, состоит из порядка 6,5 млн. конечных элементов.

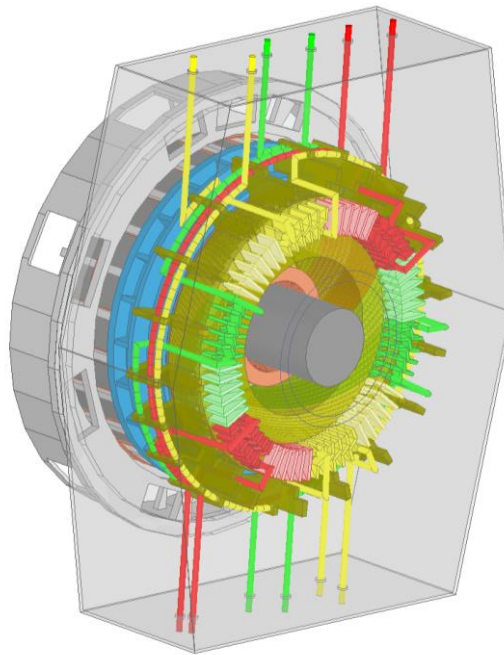
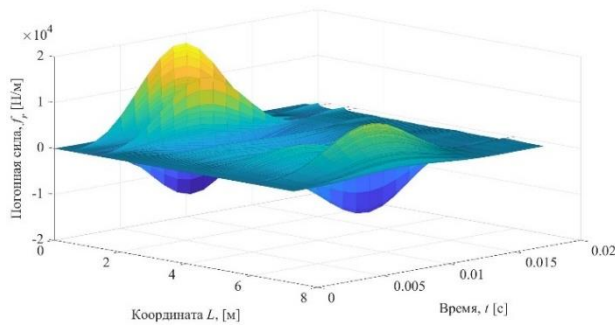


Рисунок 6 – Разработанная конечно-элементная модель торцевой зоны мощного турбогенератора с обмоткой ротора, статора, соединительными и выводными шинами, корпусом

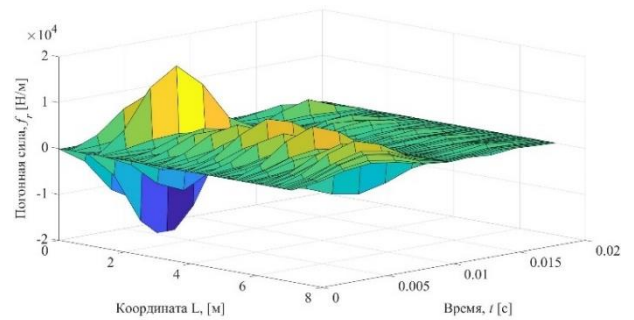
Расчёт проводился на вычислительном кластере с 64 потоками и 512 Гб оперативной памяти. Моделировалось два периода, один до и один после момента внезапного короткого замыкания с шагом 1 мс. Несмотря на возможность распараллелить задачу (не рассматривались эффекты гистерезиса и вихревых токов), расчёт занял порядка 150 часов, из которых 40 часов пришлось на

построение сетки и проведение всех требуемых проверок модели при инициализации.

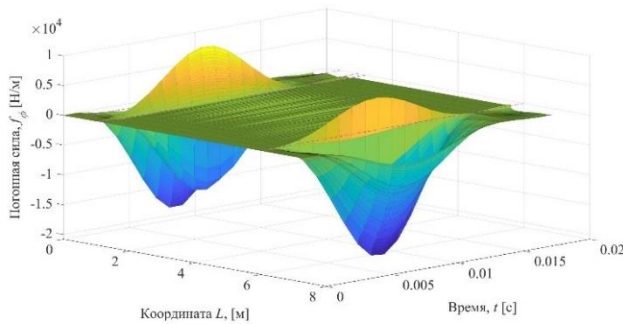
Результаты моделирования показывают хорошее совпадение результатов расчёта сил из коммерческого 3-мерного пакета и пакета «Динамика». По результатам сопоставления погонных сил, действующих на выводную шину при внезапном трёхфазном коротком замыкании, показанных на рисунке 7, сделан вывод о качественном совпадении полученных воздействий.



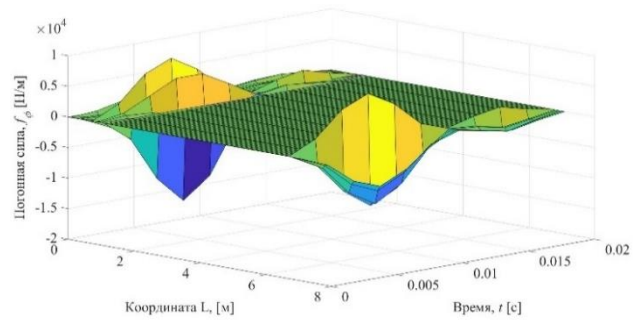
а) Радиальная компонента в коммерческом пакете



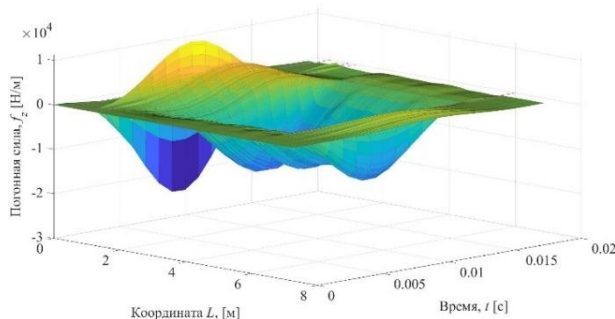
б) Радиальная компонента в пакете «Динамика»



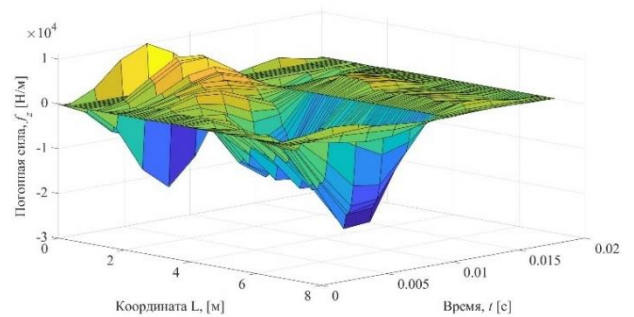
в) Окружная компонента в коммерческом пакете



г) Окружная компонента в пакете «Динамика»



д) Аксиальная компонента в коммерческом пакете



е) Аксиальная компонента в пакете «Динамика»

Рисунок 7 – Сравнение распределения погонных сил по шине 1С1 турбогенератора 1200 МВт при трёхфазном коротком замыкании в зависимости от координаты вдоль шины и времени

Для исследуемой шины 1С1 проведено исследование адекватности расчёта сил в пакете «Динамика». Для это получены огибающие радиальной, окружной и аксиальной компонент погонных сил. Результаты расчета в коммерческом пакете большей частью находятся внутри ограниченного огибающими пространства. Отдельные расхождения объяснимы вынужденными расхождениями в постановках каждой из задач, среди которых стоит отметить линейную магнитопроводность в коммерческом пакете, упрощенную форму лобовых частей и головок стержней в пакете «Динамика», учет дополнительных элементов конструкции в модели торцевой зоны.

По результатам проведённой валидации определены места приложения максимальных по величине усилий на шины. Они находятся в зонах изгиба шин, где ток меняет своё пространственное направление. Помимо немонотонности решения задачи протекания тока в данном случае в связи с наличием острого угла, также такая форма шины повлечёт за собой сингулярность при решении задачи механики. Данный эффект хорошо известен на практике, поэтому плавном перегибам шин в реальной конструкции уделяется большое внимание.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной представлена методика расчёта сил, действующих на пазовую и лобовую часть обмотки статора, соединительные и выводные шины в нестационарных режимах, таких как внезапные короткие замыкания и набросы нагрузки, в мощных турбогенераторах с одной и двумя трёхфазными обмотками на статоре. Разработанный комплекс программ позволяет конструкторам проводить поверочные электромагнитные расчёты различных конструкций торцевой зоны турбогенераторов за приемлемое для проектирования время (на порядок быстрее) при требованиях к вычислительным мощностям существенно более низким, чем предъявляемые к прямому 3-мерному конечно-элементному моделированию нестационарных процессов в коммерческих программных пакетах при сопоставимой точности получаемых результатов.

Получены следующие основные результаты:

1. выполнен анализ методов расчёта переходных процессов в синхронных машинах по схемам замещения и разработаны компьютерные модели для расчёта токов в трёхфазных и шестифазных турбогенераторах;
2. выполнен анализ методов расчёта полей в торцевых зонах, их допущениях и ограничениях, для моделирования процессов в торцевой зоне принят метод конечных элементов;
3. актуализирована методика вращающихся полей расчёта стационарного поля в активной и торцевой зоне турбогенератора, и её функционал расширен для моделирования нестационарных процессов в трёхфазных и шестифазных турбогенераторах;
4. разработана упрощённая методика расчёта электромагнитных усилий, действующих на соединительные и выводные шины турбогенераторов, путём связи полевого решения из методики вращающихся полей и коммерческого 3-мерного пакета при помощи суперпозиции полей;

5. рассчитаны усилия, действующие при внезапных набросах вращающего момента турбины, внезапных коротких замыканиях для генератора с двумя трёхфазными обмотками на статоре мощностью 1200 МВт, а также с одной обмоткой мощностью 1000 МВт, предоставлены рекомендации по снижению максимальных нагрузок, выполнено сравнение сил в относительных единицах для трёхфазной и шестифазной машины;
6. выполнена валидация применяемого метода конечно-элементного моделирования для анализа электродинамических и тепловых процессов в шинах турбогенераторов при протекании ударных токов на основе близкой мультифизичной задачи срабатывания плавкого предохранителя, характеризующегося аналогичными процессами;
7. выполнена валидация разработанной методики по результатам подробного конечно-элементного моделирования в коммерческом пакете, а также выполнено качественное сравнение распределения усилий вдоль соединительных и выводных шин с известными основными местами поломок.

IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

1. Лямин А.А. К методу визуализации полигармонических колебаний конструкций / А.А. Лямин, С.Л. Гулай, Д.А. Верховцев, С.Д. Чишко // Электрические станции. – 2020. – Т.8. – С.43–46.
2. Мурашов Ю.В. Разработка виртуального испытательного стенда для исследования плавких предохранителей / Ю.В. Мурашов, С.Д. Чишко, Н.В. Образцов, В.В. Камаев, М.С. Понедельченко, А.А. Долженков // Электричество, 2024, №4.
3. Lyamin, A.A. Application of the Method of Visualization of Polyharmonic Vibration Structures / A.A. Lyamin, S.L. Gulai, D.A. Verkhovtsev, S.D. Chishko // Power Technology and Engineering. – 2021. volume 54 pp. 929–932.
4. Murashov, I. Development of a fuse digital model for virtual testing of breaking capacity / I. Murashov, S. Chishko, N. Obrastsov, et al. // Electr Eng, 2024.
5. Малинина Т.В. Сравнительная оценка эффективности АЭС и КЭС в электроэнергетике / Т.В. Малинина, С.Д. Чишко // НТВ СПбГПУ. Экономические науки. – 2017. – Т.10, №1. – С.80-89.
6. Чишко С.Д. Методика расчёта электромагнитных сил в элементах конструкции торцевой зоны статора при внезапных нестационарных процессах в турбогенераторах / С.Д. Чишко, Н.В. Коровкин, М.Б. Ройтгарц // XIII всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург. – 2023. Т.1. С.455-457.
7. Chishko S.D. CoEnergy-based model for DC excited flux-switching motor / S.D. Chishko, Y. Tang, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova // 2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). – 2015.
8. Mongellaz R. Co-Energy-Based Lookup Table Model for DC-Excited Flux-Switching Motor: Study at Vehicle Level / R. Mongellaz, F. Sellier, S.D. Chishko, J.J.H. Paulides, E.A. Lomonova // 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). – 2015.
9. Chishko S.D. Modeling of sudden six-phase and three-phase short circuits of a six-phase turbogenerator / S.D. Chishko, A.S. Adalev, N.V. Korovkin // International Scientific Electric Power Conference 2019 (ISEPC). – IOP conference series: material science and engineering. – 2019. – Т.643.