

На правах рукописи

Филин Алексей Григорьевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЕКТНЫХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ
РАСЧЁТАХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена на кафедре «Электрические машины» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гуревич Эльрих Иосифович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Плохов Игорь Владимирович

кандидат технических наук
Рыбин Юрий Леонидович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им.
В.И.Ульянова (Ленина)»

Защита состоится « 10 » декабря 2010 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Рост единичной мощности современных турбогенераторов происходит в условиях острой рыночной конкуренции, побуждающей производителя, с одной стороны, к упрощению конструкции и повышению использования активных материалов, и, с другой стороны – к повышению надежности машины и улучшению ее эксплуатационных характеристик. Важным фактором, определяющим развитие данной отрасли, является нагрев активных частей в различных режимах работы электрических машин. Поэтому вопрос о рациональной роли моделирования тепловых процессов при проектировании электрических машин приобретает особую злободневность. Трудности, связанные с решением такого вопроса, обусловлены многообразием геометрических характеристик конструкции электрических машин и проблемой точного задания тепловых параметров. За последнее время наблюдается бурный рост электронно-вычислительных систем с развитием программных продуктов, основанных на численных методах, что выводит проектные расчёты на новый технический уровень, отличающийся высокой степенью соответствия модели реальному объекту.

Одним из важных параметров системы охлаждения электрических машин, является подогрев охлаждающей среды. Описание его распределения осложняется геометрическими особенностями вентиляционного тракта, а также наличием кондуктивных и конвективных тепловых связей, обусловленных сложной формой стоков тепла. Использование в практике усредненного значения подогрева среды снижает надежность расчёта новых ответственных конструкций, для которых требуется знание распределения температуры теплоносителя в каналах. В современных методах расчетов в полевой постановке требуется более корректный учет данного параметра.

При локальных нарушениях в системе водяного охлаждения обмоток турбогенераторов вызывает затруднения идентификация реального объема неисправности. Средства температурного контроля турбогенераторов не дают достоверной информации о нарушениях циркуляции хладагента в элемен-

тарных каналах. В этих условиях практика эксплуатации нуждается в установлении связи подогрева дистиллята с реальным объемом дефекта, что требует детального решения задачи о принципиально несимметричном температурном поле неисправной обмотки.

Из сказанного следует, что современные инженерные тепловые расчеты электрических машин нуждаются в пополнении методическим материалом в детальной полевой постановке, чем подтверждается **актуальность** задач, поставленных в данной диссертации.

Цель работы и задачи исследования. Определены следующие **цели** работы:

- 1) совершенствование методов расчета тепловых характеристик электрических машин на стадии разработки и обоснования конструкции;
- 2) решение задач технологического содержания, когда уровни необходимых термических воздействий ограничиваются термостойкостью отдельных звеньев конструкции;
- 3) температурная диагностика электроэнергетических машин, нуждающаяся в разработке и совершенствовании тестовых процедур применительно к условиям эксплуатации турбогенераторов.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

- 1) трехмерная постановка стационарных тепловых задач с реализацией решений при помощи программного пакета ANSYS с учетом подогрева охлаждающей среды в каналах применительно к анализу конструкций турбогенераторов с полным воздушным и комбинированным охлаждением;
- 2) детальный тепловой расчет, подробно учитывающий свойства объекта в сочетании с элементами технологического оборудования, позволяющий выбрать подходящий режим термического процесса, исключающий повреждение уязвимых элементов при изготовлении отдельных узлов машины;
- 3) расчетно-теоретическое исследование пространственного нестационарного температурного поля обмотки турбогенератора при нарушении цир-

куляции дистиллята в отдельных каналах системы водяного охлаждения с обоснованием значимости диагностического признака.

Методы исследований. Решение указанных задач производилось методами численного расчёта стационарных температурных полей в двумерной постановке, реализованными в программном пакете Elcut 5.0, а также стационарных и нестационарных температурных полей в трехмерной постановке с детальным учетом подогрева охлаждающей среды, реализованными в программном пакете ANSYS 10.0 с использованием встроенного языка параметрического программирования APDL. В пакете Matlab 7.0 разработана программа математического обоснования диагностической процедуры системы непосредственного водяного охлаждения обмотки статора турбогенератора, а также сформированы диагностические признаки рассматриваемой неисправности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) предложены уточняющие методики расчета стационарных полей температуры обмоток и магнитопроводов статора и ротора турбогенератора с детальным учетом подогрева охлаждающей среды;

2) разработан новый метод расчета нестационарного температурного поля обмотки статора с водяным охлаждением при произвольном состоянии охлаждающих каналов и сформированы диагностические признаки локальных неисправностей системы охлаждения;

3) на основании разработанной программы диагностики предложен тестовый режим по выявлению частичных нарушений гидравлического тракта обмотки статора турбогенератора.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1) уточненные инженерные методы расчёта электрических машин в стационарных тепловых режимах, разработанные в диссертации, пригодны для применения в практике проектирования турбо- и гидрогенераторов и опробованы соискателем в инженерной работе на предприятии «Силовые машины» Филиал «Электросила»;

2) по результатам расчёта нестационарного несимметричного поля обмотки статора с водяным охлаждением сформированы диагностические признаки и процедуры, пригодные для применения при эксплуатации мощных турбогенераторов на электростанциях.

Достоверность полученных результатов определяется использованием теоретически обоснованного современного численного метода – метода конечных элементов (МКЭ), а также сравнительным анализом результатов, полученных в ходе данной работы, с теоретическими и экспериментальными данными.

Реализация результатов работы. Разработанные методики внедрены в практику расчётных исследований теплового состояния активных частей турбогенераторов предприятия ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила».

На защиту выносятся следующие основные положения:

- 1) Уточненные методики теплового расчета активных зон турбогенераторов новых конструкций с различными системами охлаждения;
- 2) Метод учета подогрева теплоносителя при численных расчетах стационарного температурного поля активных частей электрических машин;
- 3) Методическая база для тепловых расчётов обмотки статора турбогенератора с непосредственным водяным охлаждением в нестационарных тепловых режимах;
- 4) Диагностическая процедура выявления неисправности внутреннего водяного охлаждения обмотки статора турбогенератора на электростанции.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-техническом совете предприятия ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила», научно-технических конференциях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ), а также на научных семинарах кафедры «Электрические машины» СПбГПУ. Работа является лауреатом Гранта правительства Санкт-Петербурга 2009 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 2 статьи в периодических российских рецензируемых изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 85 наименований. Работа содержит 152 страницы, включая 61 рисунок и 23 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, её научная и практическая значимость, а также кратко изложено основное содержание работы.

В первой главе сделан краткий обзор развития и современного состояния инженерных тепловых расчётов электрических машин, на основании чего выделяется круг вопросов, решение которых представляется актуальным и значимым. Теория и инженерные приложения теплового расчета, изложенные в трудах А.Е.Алексеева, И.М.Постникова, И.Ф.Филиппова, Г.М.Хуторецкого, Й.Хака, Г.Готтера, В.Г.Данько, Г.Г.Счастливого, В.В.Попова, Э.И.Гуревича, Ю.К.Васильева, Ю.Л.Рыбина, Т.Н.Карташовой и др., до настоящего времени служат эффективному решению задачи рационального проектирования электрических машин. Теоретические разработки указанных авторов направлены, главным образом, на доказательство правоты простых моделей, вводимых в практику на базе решения более или менее сложных задач стационарного и нестационарного теплообмена. Однако, с развитием техники увеличивается число вопросов, надежное разрешение которых связано с прямым использованием результатов строго поставленной тепловой задачи.

В настоящее время, в условиях развития конструкций и сопутствующего усложнения форм исследуемых объектов, практика электромашиностроения испытывает потребность во всё более объективных данных, что требует полевой пространственной постановки с последующим численным решением на основе широко применяемых в технике конечно-элементных методов. В рассматриваемую область задач входят существенно новые, более

сложные конструкции, а также традиционные объекты, в активной зоне которых имеет место трехмерный характер распространения тепловых потоков и течения охлаждающих сред. Важной тенденцией в применении современных численных расчётов является точная и избирательная адаптация программного пакета к собственным инженерным нуждам, что не только решает проблему трудоёмкости вычислений и рационального использования расчётных мощностей, но нередко обеспечивает и собственно практическую разрешимость сложной инженерной задачи. В главе 1 показана необходимость разработки алгоритмов и подпрограмм, встраиваемых в современные программные пакеты расчета температурных полей, с целью учета подогрева охлаждающей среды, обусловленного теплопритоком от стенок канала.

Прямыми нуждами производственного процесса затребованы сегодня расчеты нестационарных температурных полей в задачах технологической направленности. Решения таких задач дают основания для выбора параметров операций, типичных для электромашиностроительной отрасли (запечка, горячая посадка, сварка) и ограничиваемых специфическими условиями по локальным температурам. Практика эксплуатации турбогенераторов не удовлетворяется в полной мере существующими алгоритмами для выявления нарушения системы водяного охлаждения обмотки статора в виде закупорки элементарных каналов, поскольку в основном опирается на результаты текущего мониторинга температуры обмотки в стационарных тепловых режимах. Требуется разработка метода тестовой диагностики указанных нарушений на базе детального анализа свойств нестационарного температурного поля в активном объеме обмотки, содержащей дефекты подобного рода.

Вторая глава посвящена вопросам совершенствования методов математического моделирования стационарных и нестационарных полей температуры активных частей электрических машин. Учет специфики тепловых процессов в электрических машинах при разработке методов расчета температурного поля в активных частях позволяет избежать чрезмерного усложне-

ния модели, соответствующего лобовому использованию в этих целях универсального аппарата вычислений.

Ввиду необходимости учета температурной неоднородности теплоносителя при расчетах стационарных температурных полей в активной зоне электрической машины с газовым охлаждением потребовалась новая методическая разработка подпрограммы на встроенном языке параметрического программирования в пакете конечно-элементного расчёта ANSYS (см. рис.1). Совместное численное полевое решение задачи с итерационным аппаратом подпрограммы дает возможность сократить время, затрачиваемое на разработку и решение тепловых задач при проведении многовариантных инженерных расчетов.

Для несимметричных тепловых задач, описывающих нарушения в обмотках с водяным охлаждением, разработана математическая модель, объединяющая серию плоских кондуктивных задач с дискретизованной картиной течения и конвективного теплообмена в неповрежденных полых проводниках. Линеаризация нестационарного теплового процесса на протяжении промежутка времени Δt позволяет описать тепловой баланс в любом элементе модели на расчетных участках длиной ΔL системой уравнений для участков с номером j в пределах промежутка времени с номером i :



Рис. 1. Алгоритм программы итерационного расчета подогрева теплоносителя

$$\rho_M c_M S \Delta L \cdot \frac{\theta_i(j) - \theta_i(j-1)}{\Delta t} = \sum_{m=1}^M \frac{\theta_{mcp}(j) - \theta_{i_{cp}}(j)}{R_m},$$

$$\text{где } \theta_{i_{cp}}(j) = \frac{\theta_i(j) + \theta_i(j-1)}{2}; \quad \theta_{mcp}(i) = \frac{\theta_m(j) + \theta_m(j-1)}{2},$$

θ – температура проводника; c_M и ρ_M – теплоемкость и плотность меди; S – сечение проводника; M – число соседних элементов, связанных с j -м через тепловое сопротивление R_m .

Появление в неисправной обмотке неохлаждаемых звеньев приводит к необходимости учета огромного количества кондуктивных и конвективных связей в пределах стержня. Модели придаются качественно новые черты с многократным расширением ее возможностей по сравнению с известной задачей, основанной на дискретизации течения и теплообмена в полном элементарном проводнике (идеализация Э.И.Гуревича и В.М.Уваровой). Алгоритм представленного в диссертации решения построен с учетом современных возможностей численных решений систем уравнений чрезвычайно высокого порядка и реализован в программном пакете MatLab. Начальными условиями для разрешения описанной системы уравнений служит результат решения стационарной задачи. Разработанный метод может быть распространен на все типы электрических машин с непосредственным водяным охлаждением обмоток.

В третьей главе рассмотрен фактический материал по расчету температурных полей в двух крупных группах объектов, представляющих примеры пространственной температурной задачи: статоре с косвенным охлаждением обмотки (рис. 2)

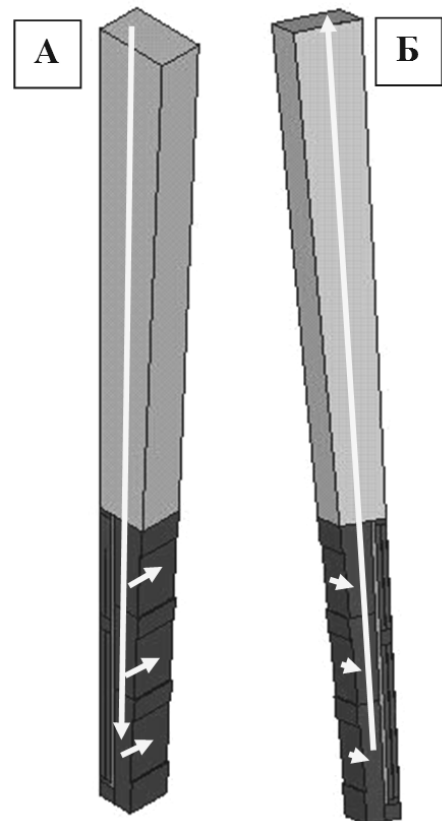


Рис. 2. Модель теплового расчета статора

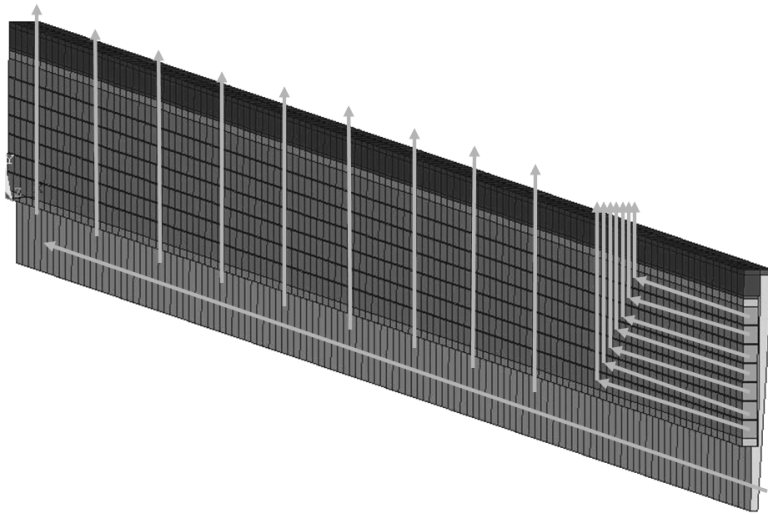


Рис. 3. Модель теплового расчёта ротора

и роторе с непосредственным газовым охлаждением при самовентиляции обмотки из подпазового канала (рис.3). Принципиальная трехмерность распространения тепловых потоков в новейшей конструкции статора с радиально-аксиальными каналами

заставляет полностью отказаться от их плоского изображения, которое, для более простых конструкций, например, в работах Т.Н.Карташовой, достигалось искусственной заменой направления потока в зубце с аксиального на тангенциальное.

Практическим итогом выполненных численных решений являлось получение исчерпывающей информации о распределении температуры в активной зоне турбогенератора, и, в частности, расчетное выявление наиболее нагретых зон обмоток статора (см. рис. 4) и ротора. На основе этой информации принимались решения о доработке конструкций в отношении системы охлаждения с последующей проверкой достигнутого эффекта

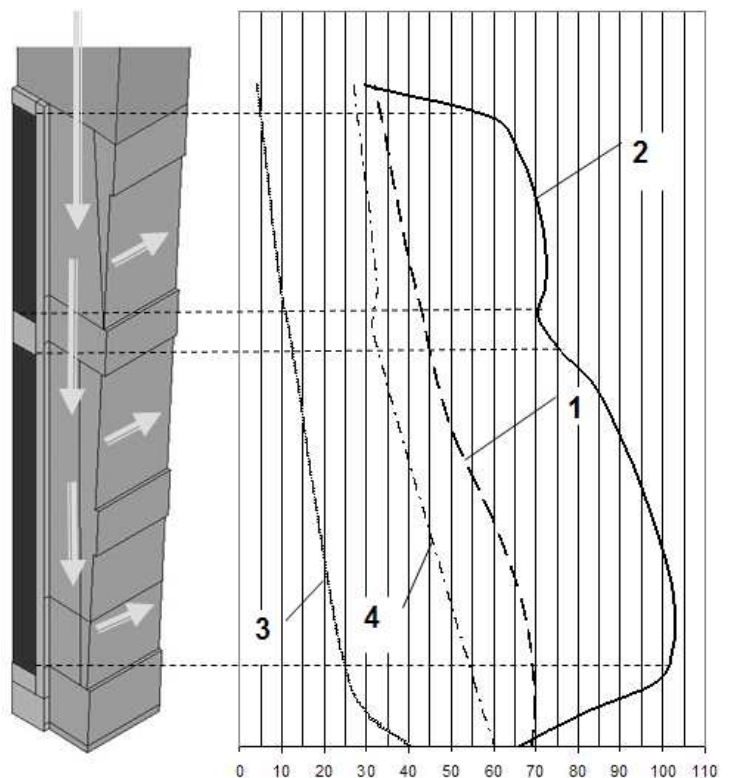


Рис. 4. Тепловое состояние пазовой зоны статора турбогенератора с форсированной воздушной системой охлаждения: 1 – превышение температуры зубца, 2 – превышение температуры обмотки, 3 – подогрев воздуха в радиальном канале с набегающей стороны, 4 – подогрев воздуха в радиальном канале со сбегающей стороны

при посредстве вышеупомянутых полевых расчетов.

В четвертой главе сформированы диагностические признаки неисправности системы непосредственного водяного охлаждения обмотки статора турбогенератора, а также предложена диагностическая процедура, выявляющая описанные неисправности турбогенератора, работающего на электростанции. Предварительное решение задачи о стационарном поле температуры обмотки показывает, что прекращение циркуляции дистиллята в двух и более смежно расположенных полых проводниках представляет реальную опасность для жизнеспособности турбогенератора. Указанные термические дефекты не могут быть однозначно идентифицированы средствами функциональной диагностики, т.е. с использованием одних только результатов текущего мониторинга температуры обмотки или дистиллята на сливе из отдельных стержней в стационарных тепловых режимах. Вероятной ошибкой при попытке подобной идентификации является преувеличение значимости дефекта (одному и тому же уровню установившейся избыточной температуры выходящего дистиллята может соответствовать не только полная закупорка отдельных каналов, но и равномерное снижение расхода дистиллята через все каналы стержня).

Предложенный в данной работе метод тестовой диагностики, основанный на простом эксперименте с отключением тока статора в режиме установившегося 3-х фазного короткого замыкания турбогенератора, может быть осуществлен при наличии датчиков штатного температурного контроля на сливе дистилля-

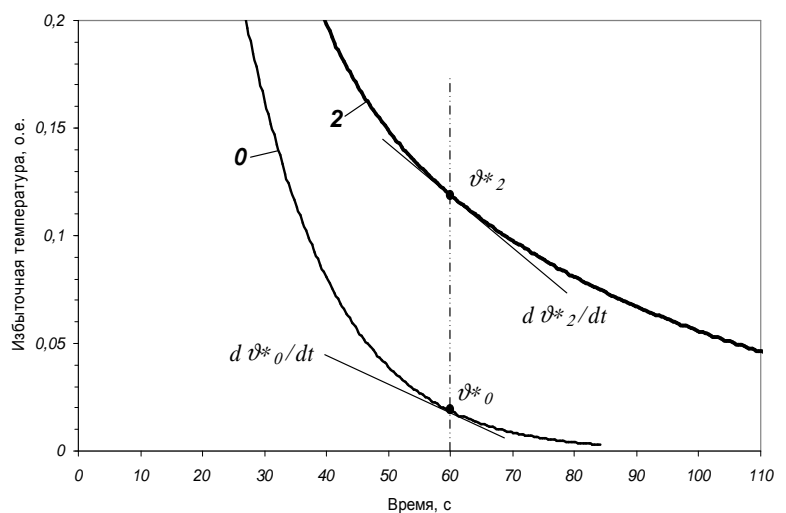


Рис. 5. Формирование диагностического признака

та из каждого стержня. Тестовая процедура состоит в отключении тока статора из предшествующего установившегося теплового состояния с последующей автоматической регистрацией изменяющейся во времени температуры дистиллята на сливе из всех стержней статорной обмотки, в том числе и из стержня, в отношении которого имеется подозрение в термическом дефекте. Распознавание дефекта строится на сопоставлении с эталоном (рис. 5 кривая 0) формы температурно-временной зависимости дистиллята на выходе из подозреваемого стержня, которая характеризует инерционность как теплового звена, состоящего из группы полого и сплошных проводников в отдельности, так и исправного стержня обмотки статора в целом. Сравнение расчетных характеристик при сбросе нагрузки производится в относительных единицах. Практическим критерием для оценки состояния полых проводников в обмотке может служить показатель термической инерции стержня на поздней стадии процесса, который для дефектного стержня должен значительно отличаться от присущего эталону. Формально данный показатель T , имеющий размерность времени, можно представить в виде отношения безразмерной функции температуры к абсолютной величине ее производной в заданный

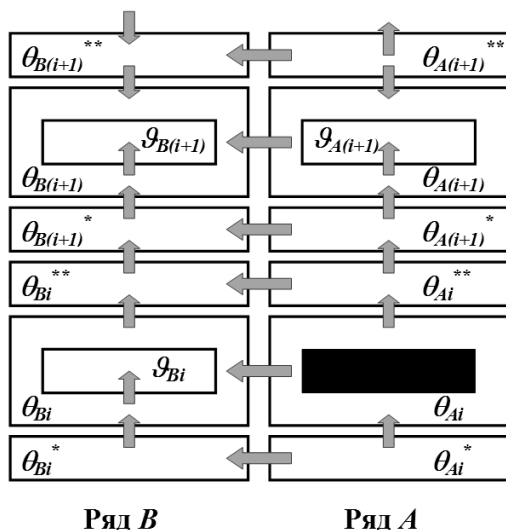


Рис. 6. Тепловые потоки стержня статора при наличии дефекта в системе охлаждения

момент времени: $T = \frac{\vartheta^*}{\left| \frac{d\vartheta^*}{dt} \right|_{t=t^*}}$. Как видно

из рис. 6, диагностическим признаком дефекта при двух закупоренных проводниках является условие: $T_2 / T_0 > 5$ для $t^* = 60$ с.

В главе 4 рассмотрено также тепловое состояние обмотки статора турбогенератора при наличии одной закупорки в режиме кратковременной 20%-ной перегрузки по току статора (см. рис. 6, рис. 7). Применение здесь строгой модели позволило получить для этой несимметричной задачи более точный резуль-

тат, чем с применением известных из литературы моделей Ю.Л.Рыбина, базирующихся на одномерной интерпретации нестационарного процесса.

В пятой главе рассматривается круг задач, охватывающий нестационарные тепловые режимы при проведении характерных технологических операций электромашиностроения.

По задачам такого рода в литературе описаны лишь расчеты С.Г.Стефановича в одномерной и двухмерной постановке для запечки изоляции обмотки статора. Применение конечно-элементных моделей нестациона-

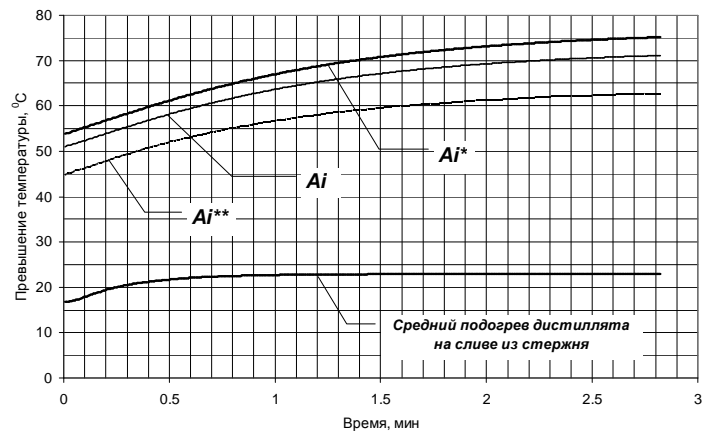


Рис. 7. Превышение температуры проводников стержня в режиме кратковременной перегрузки по току статора

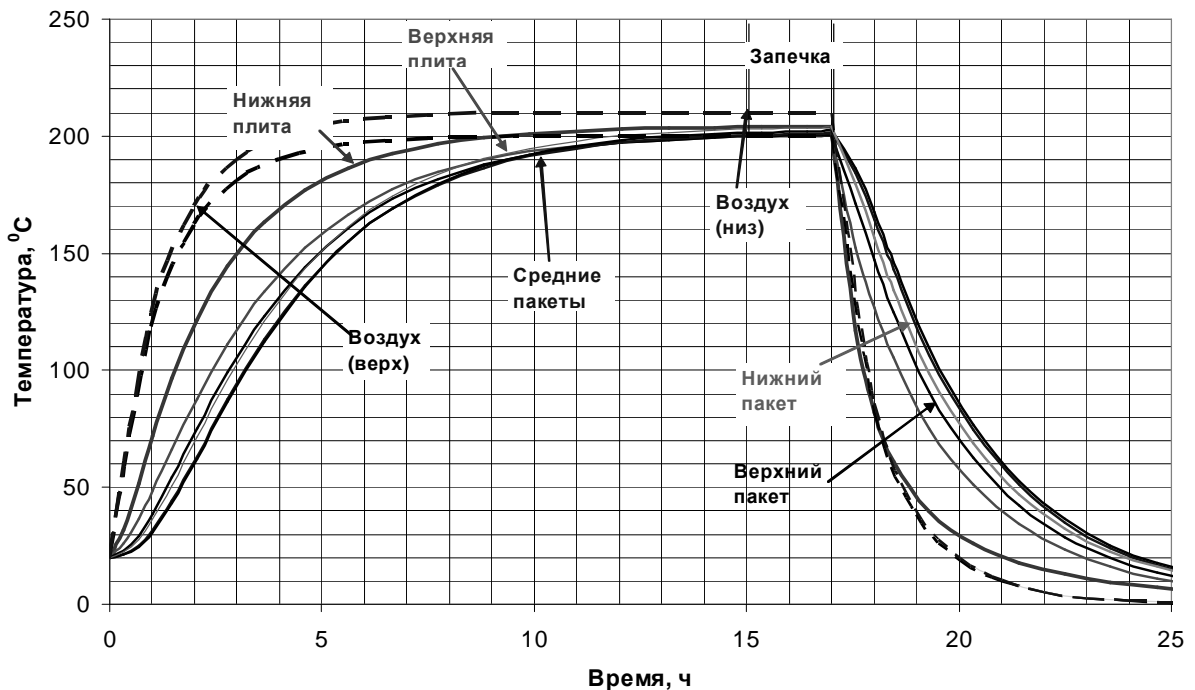


Рис. 8. Процесс запечки пакетов статора

рных полей температуры в задачах технологического назначения весьма рационально, но требует высокой степени соответствия геометрии и физических свойств модели и реального объекта. В таких задачах легко достигается надлежащая достоверность результатов благодаря их органически низкой

чувствительности к интенсивности свободной конвекции как единственному малоустойчивому входному фактору. Остальные входные параметры задач данного вида, как правило, известны с высокой надежностью и стабильны.

Запечка пакетов активной стали статора турбогенератора представляет собой операцию, рабочий режим которой – это режим постоянной температуры для полимеризации лака, и искомой величиной является время достижения этого режима, а также время остывания до температур, при которых объект извлекают из печи. На рис. 8 изображены температурно-временные зависимости для различных точек конструкции.

Насадка колец и сердечника на вал якоря возбуждателя турбогенератора осуществляется при нагревании насаживаемой на вал детали, при этом возникает опасность термического поражения изоляционных компонентов, находящихся в пазах вала. Целью расчёта является оценка экстремальных температур

в массиве изоляционных материалов. Временная зависимость превышения температуры на участке расчетной модели представлена на рис. 9: 1 – сердечник статора; 2 – промежуточное кольцо; 3 – изоляция со стороны границы сердечника; 4 – изоляция со стороны границы кольца.

Задача о сварке решена в трёхмерной постановке с граничным условием первого рода: наперед заданной является температура области сварки с бегущей ее координатой, зависящей от времени, тогда как во всех остальных точках поверхности действует граничное условие третьего рода. В литературе задача в подобной постановке отсутствует. Температурный режим сварки

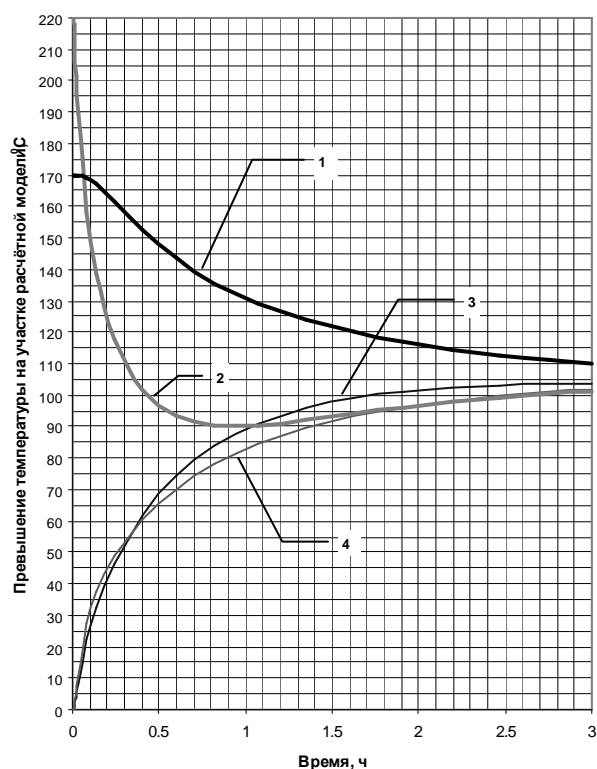


Рис. 9. Тепловой режим насадки кольца и сердечника на вал

в рассматриваемой задаче ограничен классом нагревостойкости изоляционного покрытия, нанесенного на основание одной из деталей. Температура в экстремальной точке на поверхности изоляционного покрытия изменяется согласно рис. 10.

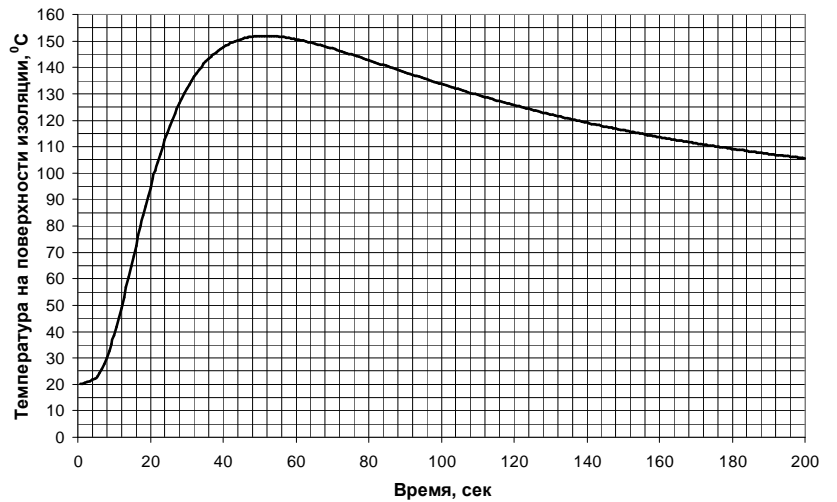


Рис. 10. Определение критической температуры изоляции в процессе сварки конструкций

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решен ряд научно-технических задач, связанных с разработкой и совершенствованием инженерных методов расчёта и диагностикой теплового состояния активных частей мощных электрических машин. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Определен круг тепловых задач турбогенеростроения, требующих детальных расчетов пространственного поля температуры активных частей в процессе проектирования новых конструкций.
2. Предложены уточненные методики теплового расчёта активных частей турбогенератора в трехмерной постановке задач с реализацией решений при помощи программного пакета ANSYS с учетом фактора подогрева охлаждающей среды в каналах применительно к анализу конструкций турбогенераторов с полным воздушным и комбинированным охлаждением.
3. Разработана новая методика учета подогрева теплоносителя в стационарных задачах температурного поля активных элементов электрических машин.
4. Разработаны алгоритмы и выполнена серия детальных тепловых расчетов технологического назначения, подробно отображающих свойства объекта в сочетании с элементами оборудования, с целью выбора подходящего режима

технологического процесса, исключающего повреждение термически уязвимых элементов в ходе отдельных производственных процедур.

5. Разработаны методическая база и алгоритм диагностических тепловых расчётов обмотки статора турбогенераторов с водяным охлаждением в нестационарных тепловых режимах при различных дефектах системы охлаждения.

6. Предложена новая методика идентификации неисправности водяного охлаждения обмотки статора при работе турбогенератора на электростанции, основанная на численном анализе результатов тестовой процедуры с измерением температуры выходящего дистиллята на протяжении нестационарного теплового режима после отключения тока статора.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Филин А.Г. Расчёт распределения воздушных потоков в турбогенераторе мощностью 320 МВт с комбинированной системой охлаждения / А.Г.Филин, Т.Н.Карташова // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы конференции студентов и аспирантов. Ч II. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2007. С 45-46.
2. Филин А.Г. Исследование температурного поля статора турбогенератора с форсированной системой охлаждения зубцовой зоны / А.Г.Филин // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы конференции студентов и аспирантов. Ч II. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2008. С 40-41.
3. Филин А.Г. Тепловое состояние обмотки и сердечника статора турбогенератора мощностью 320 МВт при отказе охладителей / А.Г.Филин // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: Материалы конференции студентов и аспирантов: Материалы лучших докладов. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2008. С 143-146.
4. **Филин А.Г. Динамический метод тестовой диагностики локальных термических дефектов в обмотке статора турбогенератора с водяным охлаждением / Э.И. Гуревич, А.Г.Филин // Электрические станции. 2009. №5. С 52-57.**

5. Филин А.Г. Математическое моделирование температурного поля обмотки статора турбогенератора в режиме перегрузки по току при локальных нарушениях системы непосредственного водяного охлаждения / А.Г. Филин // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы конференции студентов и аспирантов. Ч II. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. С 59-62.

6. Филин А.Г. Температурное поле обмотки статора мощного турбогенератора при локальных нарушениях внутренней системы водяного охлаждения / Э.И. Гуревич, А.Г.Филин // Электричество. 2010. №3. С 23-29.