ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ПОПОВ Виктор Васильевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РОТОРАХ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ АНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

Специальность 05.09.01 — электрические машины
и специальность 05.14.05 — теоретические основы теплотехники

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ленинград
1981

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

Пожертвовано

Работа выполнена в Ленинградском политехническом институте имени М. И. Калинина.

Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор *Г. Г. Счастливый*, доктор технических наук, ст. науч. сотр. *Э. Г. Кашарский*, доктор технических наук, профессор *И. Т. Талышинский*.

Ведущее предприятие — ЛПЭО «Электросила» имени С. М. Кирова.

Защита диссертации состоится «16» июня 1981 г. в 14 час. на заседании специализированного совета Д 063.38.06 при ЛПИ имени М. И. Калинина. 195251, г. Ленинград, Политехническая ул., 29, ауд. № . . . .

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенные печатью) просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря специализированного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «12» мая 1981 г.

Ученый секретарь специализированного совета
А. Б. Новгородцев

Фундаментальная библиотека
№ Б-166725
СПбПУ

ФБ СПбПУ
0001520773

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РОТОРАХ МОЩНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ АНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие отечественной электроэнергетики как ведущей отрасли народного хозяйства характеризуется непрерывным ростом единичной мощности энергетических блоков и все возрастающим использованием их материалов. Анализ современного состояния и перспектив развития мировой и отечественной электроэнергетики показывает, что основным типом электрогенераторов следует считать мощные турбогенераторы. Создание турбогенераторов большой единичной мощности связано с решением ряда научно-технических проблем. Одной из важнейших является проблема обеспечения термической стойкости основных конструктивных элементов турбогенераторов при анормальных режимах. Для решения этой проблемы необходимо располагать детальными сведениями о пространственно-временном распределении взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и термомеханических полей во всех и,в первую очередь, в наиболее напряженных узлах и элементах и о влиянии на эти поля конструкции, материалов, схемы охлаждения и технологии производства турбогенераторов. На важность и актуальность таких исследований неоднократно указывалось в постановлениях и координационных планах НИР и ОКР Госкомитета СССР по науке и технике, Академии Наук СССР, "Союзэлектротяжмаш", а также в решениях ряда международных и всесоюзных конференций по проблемам электроэнергетики и крупного электромашиностроения.

Цели и задачи настоящей работы направлены на решение научно-технической проблемы обеспечения термической стойкости основных элементов и узлов ротора мощных отечественных турбогенераторов на базе комплексных исследований взаимосвязанных физических полей и процессов, возникающих при анормальных режимах.

Основными задачами работы являются:

I. Разработка комплекса обобщенных математических моделей для исследования взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и термомеханических полей, возникающих в основных элементах и узлах мощных отечественных турбогенераторов при анормальных режимах, с учетом их реальной геометрии и структуры, условий сопряжения и охлаждения.

2. Разработка и совершенствование машинных методов и средств исследования физических полей в мощных турбогенераторах.

3. Исследование влияния конструкции, характеристик материалов, условий сопряжения и охлаждения на распределение вихревых токов и обусловленных ими температурных и термомеханических полей в конструктивных элементах и узлах ротора турбогенератора при анормальных режимах. Оценка чувствительности температурного поля к изменению конструкции, характеристик материалов, контактных сопротивлений, схемы и параметров системы охлаждения. Оценки эффективности мероприятий по повышению термической стойкости роторов к несимметричным режимам.

4. Исследование влияния различных теплофизических факторов на распределение температурного поля в проводниках и изоляции обмоток с непосредственным охлаждением в нормальных эксплуатационных режимах и при кратковременных перегрузках по току.

5. Исследование пространственного и временного распределения термомеханических напряжений и деформаций в бандажном узле ротора турбогенератора в процессе технологической посадки его бандажного кольца. Оценка контактных условий на посадочных поверхностях.

Методы исследования. Расчетно-теоретические исследования выполнены на основе численных решений соответствующих краевых задач математической физики. В качестве основного математического метода используется метод сеток, численно реализуемый на аналоговых моделях или ЭВМ. Достоверность и точность используемых методов исследования оценивается путем обширного сопоставления расчетно-теоретических результатов с данными экспериментальных исследований на натурных машинах.

Научная новизна работы содержится как в методологических основах, так и в научно-практических результатах решения рассматриваемой проблемы. Основными новыми научными результатами являются:

1. Математические модели и методы электрического моделирования переменного электромагнитного поля в проводниках электрических обмоток.

2. Система математических моделей и практических методов электрического моделирования и расчета вихревых токов в основных элементах и узлах ротора турбогенератора при анормальных режимах.

3. Обобщенные математические модели и машинные методы исследования температурного поля в обмотке и массивных элементах ротора

турбогенератора при анормальных режимах.

4. Комплексная математическая модель и машинные методы исследования взаимосвязанных теплового и термомеханического полей в бандажном узле ротора турбогенератора.

5. Исследование вычислительных схем и способов организации итерационных процессов при численных расчетах методом сеток электромагнитного поля в торцовой зоне электрических машин и температурного поля в изоляции обмоток с непосредственным охлаждением.

6. Исследование особенностей распространения электромагнитной волны в пазах электрической машины, заполненных плоскими нетранспонированными проводниками.

7. Исследование распределения вихревых токов и обусловленных ими температурных и термомеханических полей в конструктивных элементах ротора основных типов отечественных турбогенераторов при несимметричных режимах.

8. Исследование термоупругих напряжений и деформаций в бандажном узле ротора, возникающих при технологической посадке бандажного кольца в процессе производства турбогенератора.

9. Исследование влияния контактных сопротивлений на распределение вихревых токов и температурного поля в конструктивных элементах ротора при анормальных режимах.

Практическая ценность работы заключается в результатах научных обобщений и в методологических основах выполненных целенаправленных исследований взаимосвязанных физических полей в мощных турбогенераторах. Основные положения методологических разработок могут быть эффективно использованы для расчетно-теоретических исследований физических полей и процессов в электрических машинах других типов или конструктивных модификаций. Обобщенные результаты исследований представляют собой основу для научного прогнозирования и технико-экономического обоснования конструкторско-технологических мероприятий по повышению термической стойкости элементов и узлов ротора отечественных турбогенераторов при анормальных режимах.

Реализация результатов работы. Выполненная работа является результатом длительного участия автора в исследованиях физических полей электрических машин методами математического моделирования, проводимых в течение многих лет в ЛПИ им.М.И.Калинина на кафедрах ТОЭ

и электрических машин совместно с отделами ВНИИ электромашиностроения и ЛПЭО "Электросила" под научным руководством чл.-корр. АН СССР К.С.Демирчяна и проф.А.И.Важнова.

Основные результаты и выводы диссертационной работы были использованы при:

- разработках и научных обоснованиях инженерных методов тепловых расчетов обмоток турбогенераторов единой унифицированной серии турбогенераторов ;

- разработках и научных обоснованиях конструкции бандажного узла ротора уникального турбогенератора ТВВ-1200-2 ;

- технико-экономических обоснованиях мероприятий по повышению термической стойкости к несимметричным режимам роторов турбогенераторов, выпускаемых и прогнозируемых к выпуску в ЛПЭО "Электросила" ;

- обосновании конструкции и критерия термической стойкости ротора турбогенератора с полным водяным охлаждением ТЗВ-800-2 ;

- разработках и научном обосновании конструкции бандажного узла единой унифицированной серии турбогенераторов ;

что подтверждается соответствующими актами.

Научные положения диссертационной работы используются также в учебном процессе при чтении специальных лекционных курсов: "Электромагнитные расчеты электрических машин", "Переходные процессы в электрических машинах переменного тока", "Теплопередача в электрических машинах" и "Турбо- и гидрогенераторы".

Апробация работы. Отдельные разделы диссертации докладывались на научно-технических конференциях ЛПИ им.М.И.Калинина (Ленинград, 1964, 1969 и 1972 г.г.), межвузовских научно-технических конференциях (Свердловск, 1969 г. Москва, 1972 г.), отраслевых научно-технических конференциях ВНИИ электромаш (Ленинград, 1969, 1970, 1973 и 1975 г.г.), республиканских научно-технических конференциях "Современные проблемы энергетики" (Киев, 1973 и 1976 г.г.) , республиканском научно-техническом семинаре "Сверхпроводники, гиперпроводники и криогенное охлаждение в электротехнике и энергетике" (Киев 1977 г.) , всесоюзном научно-техническом совещании "Проблемы развития тяжелого электромашиностроения для энергетики" (Ленинград, 1975), международном симпозиуме "Электрические машины и трансформаторы" (ГДР, Ильменау, 1971), семинаре секции машинных методов и средств решения краевых задач при ленинградском областном правлении НТОРЭС им.А.С.Попова. В 1980 г.

разделы работы, относящиеся к исследованию тепловых и электромагнитных полей в роторах мощных отечественных турбогенераторов, экспонировались на ВДНХ СССР.

Основные вопросы по материалам диссертации изложены в 50 научных статьях и публикациях и в 20 научных отчетах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы из 190 наименований ; изложена на 398 страницах. Текст изложен на 266 стр.

Содержание работы

Во введении дается краткий обзор состояния исследований некоторых основных проблем создания и обеспечения высокой эксплуатационной надежности электрогенераторов мощных энергоблоков, отмечается актуальность проблемы термической стойкости основных элементов и узлов мощных турбогенераторов и недостаточность ее исследования, особенно в теоретическом отношении. Указывается на необходимость комплексного исследования взаимосвязанных полей и процессов различной физической природы при решении этой проблемы. Обсуждаются эффективные методы исследования физических полей в электрогенераторах мощных энергоблоков. Отмечается все возрастающая роль методов математического моделирования с использованием средств вычислительной техники и успехи в исследовании физических полей в мощных турбогенераторах методами математического моделирования, связанные с работами советских и зарубежных ученых: А.И.Важнова, А.И.Вольдека, И.А.Глебова, Ф.Г.Гусейнова, Я.Б.Данилевича, В.Г.Данько, К.С.Демирчяна, В.В.Домбровского, А.В.Иванова-Смоленского, Е.Я.Казовского, Э.Г.Кашарского, М.П.Костенко, В.М.Куцевалова, Р.А.Лютера, Л.Р.Неймана, А.И.Москвитина, Л.Г.Мамиконянца, И.М.Постникова, Г.Г.Счастливого, Г.Н.Тер-Газоряна, О.В.Тозони, Г.М.Хуторецкого, C. Concordia, J.M. Canay, B.J. Chalmers, T. Kawamura, M. Effrat, N. Takahashi, A.J. Wood и других. В заключение формулируются основные задачи диссертационной работы и основные научные положения, выносимые на защиту.

Переменное электромагнитное поле в активной зоне электрических машин с замкнутыми обмотками

Распределение переменного электромагнитного поля в электрической машине существенно зависит от наличия в ней массивных проводящих элементов и замкнутых обмоток. При этом роль обмотки как среды, где индуктируются вихревые токи, принципиально отличается от той, какую

выполняют сплошные проводящие среды. Это отличие обусловлено тем, что токи во всех последовательно соединенных проводниках должны быть одинаковыми, а плотность тока в некоторой точке сечения определяется не только электрической напряженностью, индуктированной в этой точке, но и величиной и распределением электрической напряженности по сечению и длине всех последовательно включенных проводников. Учет такой особенности в задачах по расчету переменного электромагнитного поля приводит к необходимости определять составляющую плотности вихревого тока $\dot{\delta}_{стор.}$ обусловленную кондуктивной связью последовательно включенных проводников. Для условий плоскопараллельного поля, которые имеют место в активной зоне электрических машин, $\dot{\delta}_{стор.}$ можно определить из анализа схемы замещения обмотки. Если магнитная ось обмотки совпадает с осью симметрии исследуемого поля, имеем

$$\dot{\delta}^{(\rho)}_{стор} = j\omega\gamma\left[\frac{1}{S_\delta}\int_{S_\delta}\dot{A}^{(\rho)}dS - \frac{1}{wS_\delta}\sum_{\alpha=1}^{w}\int_{S_\delta}\dot{A}^{(\alpha)}dS\right]. \qquad (Iа)$$

При совпадении оси обмотки с осью антисимметрии поля, получаем:

$$\dot{\delta}^{(\rho)}_{стор.} = j\omega\gamma\frac{1}{S_\delta}\int_{S_\delta}\dot{A}^{(\rho)}dS \qquad (Iб)$$

Индексы ρ и α здесь определяют номера активных проводников обмотки, состоящей из W витков сечением S_δ. $\dot{A}$ - векторный потенциал.

По выражениям вида (I) построена общая методика электрического моделирования обмоток при исследовании переменного электромагнитного поля в активной зоне электрических машин. Электрический аналог строится на базе R, L, C элементов. При моделировании переменного магнитного поля, возбуждаемого в неявнополюсных синхронных машинах гармоническими волнами линейной токовой нагрузки статора, когда область исследования можно ограничить половиной зубцового деления ротора, учет влияния проводников, расположенных в других пазах, организуется на базе разработанной общей методики.

Полученные в работе уравнения позволили решить задачу о распределении векторов переменного электромагнитного поля в пазу с плоскими проводниками для практически важного случая, когда магнитную проницаемость зубцов можно принять бесконечно большой. Задача обобщена на случай проникновения плоской электромагнитной волны в ограниченное по толщине пространство, образованное из плоских, изолированных

друг от друга и последовательно соединенных проводников. Найденное решение, повторяя известные результаты в отношении распределения тока и магнитного поля, дополняет их сведениями о распределении электрического поля. Результирующая электрическая напряженность $\dot{E}$ и две ее составляющие - индуктированная $\dot{E}_{инд.}$ и сторонняя $\dot{E}_{стор.}$, обусловленная кондуктивной связью проводников, - оказываются равными:

$$\dot{E}^{(p)} = -(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}}\, H_e \left[C'_{p1} e^{-ky} + C'_{p2} e^{k(y-h)}\right], \qquad (2а)$$

$$\dot{E}^{(p)}_{инд.} = -(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}}\, H_e \left[C'_{p1} e^{-ky} + C'_{p2} e^{k(y-h)} + L'_p\right], \qquad (2б)$$

$$\dot{E}^{(p)}_{стор.} \quad (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\gamma}}\, H_e L'_p, \qquad (2в)$$

где $k^2 = j\omega\mu\gamma$, H_e - напряженность магнитного поля на поверхности верхнего проводника, h - толщина проводника.

Постоянные C'_{p1}, C'_{p2} и L'_p определяются из известных граничных условий, число которых равно $2S_n$, и условий (3)

$$C'_{p1} + C'_{p2} = C'_{\alpha 1} + C'_{\alpha 2}, \quad \alpha = 1,2,\ldots S_n; \qquad (3а)$$

$$\sum_{p=1}^{S_n} L'_p = 0, \qquad (3б)$$

число которых равно числу активных проводников в пазу - S_n.

Полученный результат позволил уточнить расчет параметров обмоток ротора при анализе электрических машин переменного тока весьма эффективным методом удельных параметров, разработанным И.М.Постниковым, Г.Г.Счастливым и др., а также существенно упростить схемы и процедуры электрического моделирования обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины.

Переменное электромагнитное поле в роторе турбогенератора с изолированной посадкой бандажного кольца

Увеличение единичной мощности турбогенераторов с изолированной посадкой бандажа свыше 100 МВт сопровождалось резким понижением термической стойкости его ротора при несимметричных режимах. Это обстоятельство побудило к глубоким исследованиям электромагнитных и тепловых процессов в торцовых зонах ротора турбогенератора при несиммет-

ричных режимах. Основополагающие исследования применительно к идеализированным моделям были выполнены C. Concordia, A.J. Wood, Э.Г.Кашарским и др. Модели, разрабатываемые в настоящей работе для исследования вихревых токов одновременно во всех массивных элементах и узлах ротора, как с изолированной, так и с непосредственной посадкой бандажа, наиболее полно учитывают их реальную геометрию и структуру, за исключением структуры пазовых клиньев, которые предполагаются сплошными по всей длине. Магнитная проницаемость и электропроводность материалов ротора принимаются постоянными. Особенности распределения вихревых токов в зоне стыка пазовых клиньев ротора рассматриваются отдельно, с учетом нелинейности магнитных характеристик роторной стали. Внутренняя поверхность сердечника статора предполагается гладкой, а его магнитная проницаемость бесконечно большой. Свойства материалов, ограничивающих лобовое пространство, идеализируются так, чтобы исследование поля ограничить внутренним пространством машины. Граничная задача для вихревых токов в бочке ротора с отставленным бандажом при анормальных режимах с резким проявлением поверхностного эффекта сводится к определению в плоскости поперечного сечения спрямленного турбогенератора комплексных амплитуд пространственных гармоник аксиальной $\dot{A}_{zK}$ и тангенциальной $\dot{A}_{xK}$ составляющих векторного потенциала, удовлетворяющих уравнениям:

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_{zK}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_{zK}}{\partial y^2} - \left[\left(\frac{K\pi}{L}\right)^2 + j\omega\mu\gamma\right]\dot{A}_{zK} = -\mu\,\dot{\delta}_{zK,стор.}, \quad (4а)$$

$$\frac{\partial \dot{A}_{xK}}{\partial x} - \left(\frac{K\pi}{L}\right)\dot{A}_{zK} = 0. \quad (4б)$$

Распределение $\dot{A}_{zK}$ находится посредством моделирования (4а) на электрических сетках, распределение $\dot{A}_{xK}$ - путем численного интегрирования (4б). Электрическое моделирование (4а) имеет особенности, связанные с организацией процедур моделирования, поскольку приходится получать на модели решения для очень большого количества гармоник. В работе реализуется метод приближенного определения $\dot{A}_{zK}(K)$ и $\dot{A}_{xK}(K)$ с помощью аппроксимирующих функций, найденных по нескольким дискретным значениям $\dot{A}_{zK}$, полученным непосредственно на модели.

Исследование вихревых токов и потерь в роторе турбогенераторов с изолированной посадкой бандажа при несимметричных режимах было

выполнено для машин с внутренней геометрией бочки ротора, соответствующей отечественным турбогенераторам ТВФ и ТВВ мощностью от 100 до 800 МВт. Одновременно с целью оценки влияния геометрии зубцового слоя бочки ротора определялись вихревые токи и потери в идеализированном цилиндрическом роторе.

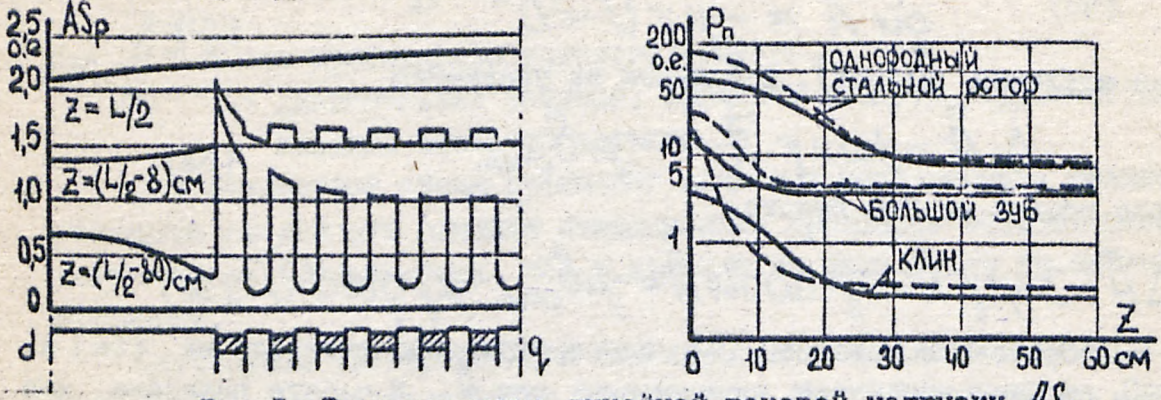


Рис.I. Распределение линейной токовой нагрузки AS_p и поверхностных потерь P_n в элементах бочки ротора при несимметричном режиме в турбогенераторах мощностью 100(– – –)и 800(———)МВт.

По результатам выполненных исследований установлен общий характер распределения вихревых токов и обусловленных ими потерь в роторе и выявлены локальные зоны, где их концентрация оказывается наибольшей. Наибольшие потери в центральной части ротора с дюралюминиевыми клиньями выделяются посередине большого зуба, в торцовой - посередине зубцовой зоны. Оценено влияние воздушного зазора, конечной длины, геометрии и структуры зубцовой зоны ротора на величину и распределение потерь от вихревых токов в его конструктивных элементах.

Электромагнитное поле в торцовых зонах электрических машин переменного тока

Граничную задачу по расчету переменного электромагнитного поля в торцовых зонах спрямленных электрических машин целесообразно формулировать в терминах векторного $\vec{A}$ и скалярного $\dot{U}$ потенциалов, используя при этом разделенные граничные условия для трехмерных составляющих векторного потенциала, предложенные в 50-х годах А.И.Вольдеком. Основополагающие и принципиальные вопросы математического моделирования таких полей разработаны в трудах А.И.Вольдека, К.С.Демирчяна и др. Однако позднее рядом исследователей было высказано утверждение, что использование таких условий на внешних границах, ограниченных идеальным магнетиком, "приводит к неправильным результатам в

задачах по расчету магнитного поля в лобовом пространстве турбогенератора". Основанием для таких утверждений послужило экспериментально обнаруженное невыполнение в локальных зонах исследуемой области калибровочного условия

$$div\,\dot{\bar{A}} = -\mu\gamma\dot{V} = 0 \qquad (5)$$

в распределении $\dot{\bar{A}}(x,y,z)$, найденном из уравнения

$$\Delta\dot{\bar{A}} - j\omega\mu\gamma\dot{\bar{A}} = -\mu\dot{\delta}_{стор.}, \qquad (6а)$$

которое обычно решают вместо

$$\Delta\dot{\bar{A}} - j\omega\mu\gamma\dot{\bar{A}} - grad\,div\,\dot{\bar{A}} = -\mu\dot{\delta}_{стор.} + \mu\gamma\,grad\,\dot{V}. \qquad (6б)$$

Калибровочное условие (5) непосредственно вытекает из (6а) и системы граничных условий, принимаемых для $\dot{\bar{A}}$. В работе показано, что для рассматриваемого класса задач отмеченное невыполнение условия (5) при численном решении (6а) обусловлено особенностями этого решения в окрестностях особых граничных точек, которые возникают при разделенных граничных условиях независимо от способа идеализации внешних границ. Оценены возникающие при этом погрешности в определении дифференциальных и интегральных характеристик поля.

Реализация тех или иных граничных условий при численных расчетах поля на ЭВМ приводит к различным условиям сходимости итерационных процессов, если таковые используются. В работе экспериментально исследовалось влияние вида граничных условий на сходимость итерационных процессов численного решения методом сеток статической электромагнитной задачи для торцовой зоны турбогенератора. Было обнаружено, что обычные итерационные процессы (простая итерация, итерация Зейделя, различное итерирование граничных и внутренних узлов) для разностных схем граничных задач со связанными граничными условиями на границах относительно большой протяженности не сходятся, хотя в ходе итерационного процесса получались решения с достаточно высокой точностью ($\varepsilon = 10^{-4} \div 10^{-5}$), а численные значения составляющих $\bar{A}$ в ряде характерных точек совпадали с контрольными значениями. Для обеспечения сходимости получающейся разностной схемы

$$N\bar{A} = \bar{b} \qquad (7)$$

оказалось удобным воспользоваться итерационным процессом

$$(N+N_1)\bar{A}^{(k)} = \bar{B} + N_1 \bar{A}^{(k-1)}, \qquad (8а)$$

$$\bar{A}^{(0)} = 0, \qquad (8б)$$

где $\bar{A}^{(k)}$ – K -ое приближение искомого вектора,

N_1 – диагональная матрица, элементы которой укрупняют диагональные элементы матрицы N .

Для разностной схемы граничной задачи с разделенными граничными условиями сходимость обычных итерационных процессов обеспечивается со скоростью на порядок выше, чем в задачах со связанными граничными условиями.

Процедурам электрического моделирования на аналоговых моделях в наибольшей мере соответствуют разделенные граничные условия. Однако практическая их реализация сопряжена с трудностями, которые до последнего времени сдерживали применение электрических моделей для решения трехмерных электромагнитных задач. В статических задачах эти трудности связаны с моделированием разрывности составляющей $\dot{A}_n$, нормальной к границе раздела сред, при равенстве нормальных производных:

$$\frac{1}{\mu_I}\dot{A}_n^{(I)} = \frac{1}{\mu_{II}}\dot{A}_n^{(II)}; \quad \left(\frac{\partial \dot{A}_n}{\partial n}\right)^{(I)} = \left(\frac{\partial \dot{A}_n}{\partial n}\right)^{(II)}. \qquad (9а)$$

В динамических задачах добавляются трудности реализации условия равенства нормальных составляющих плотности тока на границах раздела сред:

$$-\gamma_I\left[j\omega \dot{A}_n^{(I)} + (grad_n \dot{V})^{(I)}\right] = -\gamma_{II}\left[j\omega \dot{A}_n^{(II)} + (grad_n \dot{V})^{(II)}\right]. \qquad (9б)$$

В работе рассмотрены и предложены практические методы реализации условия (9а) на электрических сетках посредством: 1/ Π -образных схем; 2/ микротрансформаторов с коэффициентом трансформации $\kappa_T = \mu_I / \mu_{II}$; и 3/ переменного масштаба. Получены оценки погрешностей моделирования, вносимых каждым из предложенных методов реализации (9а) и выработаны рекомендации по их снижению. Экспериментальная проверка показала, что в отношении точности моделирования все предлагаемые методы примерно равноценны. Техническая реализация условий (9а) обеспечивается наиболее простым образом при использовании микротрансформаторов.

Рассмотрены и предложены практические методы реализации на электрических сетках условий (9б) посредством L, C элементов, включаемых в граничные узлы сопрягаемых сред.

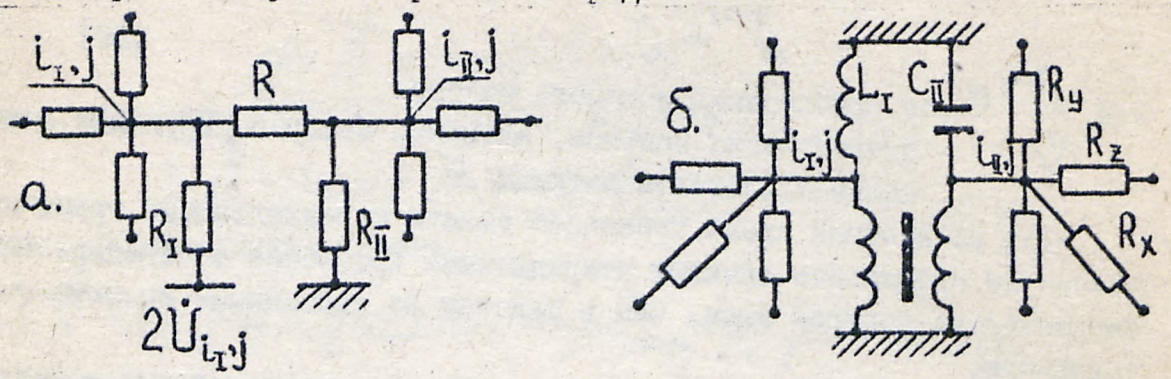


Рис.2. Электрические схемы внутренних граничных узлов, реализующие условие (9а) посредством П -образных схем (а) и условия (9а) и (9б) посредством микротрансформаторов и L, C элементов (б).

На основе разработанных практических методов раздельного моделирования трехмерных составляющих векторного потенциала исследовано распределение вихревых токов и потерь в электромагнитных экранах ротора криотурбогенераторов при асинхронных и несимметричных режимах. Установлено, что наибольшая интенсивность электромагнитных и тепловых процессов в электромагнитных экранах как при асинхронных, так и при несимметричных режимах всегда имеет место в центральной их части.

Вихревые токи, индуктируемые магнитным полем якоря в роторе турбогенератора с непосредственной посадкой бандажного кольца

Решение полевой задачи по определению вихревых токов одновременно во всех массивных элементах ротора с непосредственной посадкой бандажа еще не представляется возможным. В настоящей работе эти токи находятся из цепно-полевой задачи, в которой величина токов в каждом элементе ротора определяется из анализа электрической цепи - схемы замещения массивного ротора для вихревых токов, а параметры этой схемы и относительное распределение токов - из частных полевых задач для ограниченных участков ротора.

Структура схемы замещения бочки ротора для вихревых токов выбирается в соответствии с предполагаемым характером их распределения

и принимаемой ступенчатой аппроксимацией аксиального распределения поля ; в ней отдельно выделяются элементы, соответствующие зубцу, клину и демпферу . Для зоны бандажного узла схема замещения представляется двумя параллельными цепочками, по которым протекают полные тангенциальные токи в бандажном кольце и короткозамыкающей части демпферной гребенки. Изолированная от массива ротора обмотка возбуждения выделяется в самостоятельный контур.

Частная полевая задача для аксиальных вихревых токов в бочке ротора формулируется относительно аксиальной составляющей векторного потенциала $\dot{A}_z$, а для тангенциальных токов - относительно аксиальной составляющей магнитной напряженности $\dot{H}_z$. Минимальный тангенциальный размер исследуемой области, - суть поперечного сечения бочки ротора и воздушного зазора, ограниченного гладкой поверхностью внутренней расточки сердечника статора с бесконечно большой магнитной проницаемостью, - в обоих случаях принимается равным половине зубцового деления. Граничная задача по определению тангенциальных вихревых токов в бандажном узле ротора, параметров и ЭДС в тангенциальных элементах схемы замещения бочки ротора формулируются относительно тангенциальной составляющей векторного потенциала $\dot{A}_x$. В качестве источников поля в этом случае выступают тангенциальные токи лобовых частей обмоток статора и ротора. Предполагая их пространственное распределение в тангенциальном направлении гармоническим, область исследования можно ограничить четвертью продольного сечения турбогенератора, включая и лобовые пространства.

В работе рассмотрены практические процедуры электрического моделирования частных электромагнитных задач с учетом влияния контактных сопротивлений и замкнутой обмотки возбуждения. Обобщены методики и унифицированы структуры электрических моделей для моделирования тангенциальных вихревых токов в бочке и бандажном узле ротора турбогенератора.

По результатам моделирования частных электромагнитных задач выявлено влияние контактных электрических сопротивлений на распределение тангенциальных вихревых токов в зубцовом слое ротора. Показано, что с увеличением контактного сопротивления между зубцом и клином заметно возрастает ток, замыкающийся по стенкам и дну паза, разгружая тем самым элементы зубцового слоя.

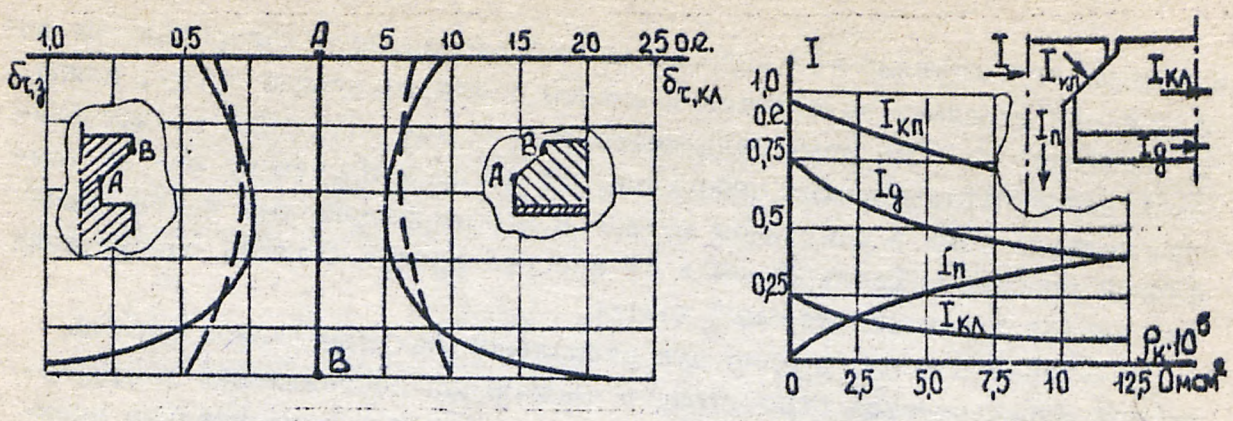


Рис.3. К оценке влияния контактного электрического сопротивления между зубцом и титановым клином на распределение при несимметричном режиме тангенциального вихревого тока по ширине контактной площадки (— $\rho_к = 0$; --- $\rho_к = 2{,}5 \cdot 10^{-5}$ Ом см²) и между элементами зубцового слоя.

Исследование распределения вихревых токов в элементах и узлах ротора турбогенератора с непосредственной посадкой бандажного кольца при несимметричном режиме было выполнено для ТВВ-1200-2. Распределение аксиальных AS_z и тангенциальных AS_τ токовых нагрузок в элементах бочки ротора и бандажного узла ТВВ-1200-2 при несимметричном режиме показано на рис.4. Линейные нагрузки определены в долях токовой нагрузки статора.

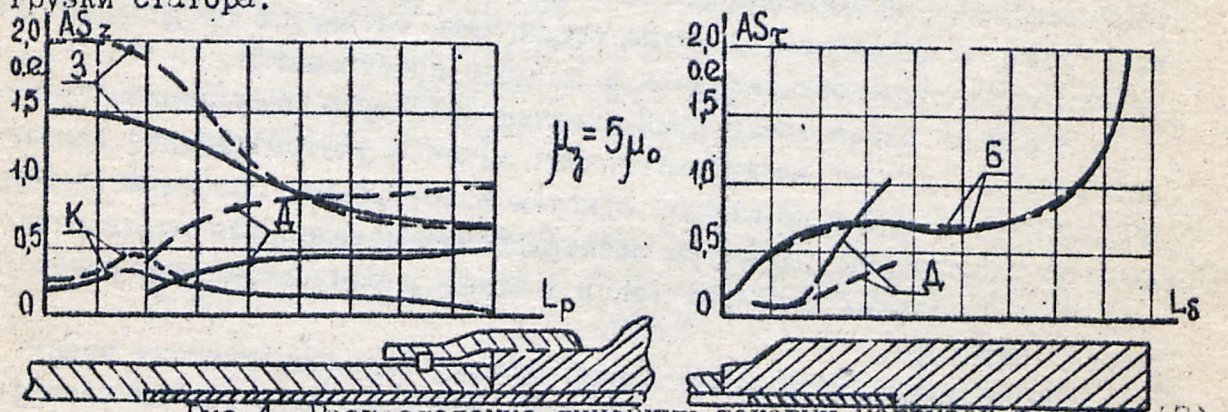


Рис.4. Распределение линейных токовых нагрузок в зубце (З), титановом клине (К), бандажном кольце (Б) и демпферной гребенке (Д) бандажного узла ТВВ-1200-2 при несимметричном режиме. (- от магнитного потока якоря, пульсирующего по продольной оси, - - от потока по поперечной оси)

В результате исследований установлена роль каждого конструктивного элемента бочки ротора и бандажного узла в качестве токопровода для вихревых токов. Наибольшая токовая нагрузка в центральной части

бочки ротора этого турбогенератора приходится на зубец. В торцовой зоне бочки ротора, там где появляются демпферные стержни под пазовыми клиньями, токовая нагрузка в зубце существенно уменьшается. Наличие демпфера приводит также к снижению токовой нагрузки и в клине, ток в котором непосредственно на торце обращается в нуль, поскольку торец клина не имеет электрического контакта с бандажным кольцом. Короткозамкнутая обмотка возбуждения вследствие низкой электропроводности титановых клиньев существенно разгружает от вихревых токов центральную часть зубцов и клиньев и в тем большей мере, чем выше магнитная проницаемость стали зубцов. Влияние замкнутой обмотки возбуждения на распределение токовой нагрузки в бандажном кольце оказывается заметным лишь при высоких значениях магнитной проницаемости стали зубцов, когда индуктируемый в обмотке возбуждения ток оказывается значительным. Выявлено, что конструкция бандажного узла ТВВ-1200-2 практически полностью разгружает бочку ротора от тангенциальных вихревых токов. Переход тока из аксиального в тангенциальный происходит в пределах бандажного и короткозамыкающего демпферного кольца.

Локальные концентрации вихревых токов, индуктируемых в конструктивных узлах ротора турбогенератора магнитным полем якоря

Практическое решение граничных задач по определению вихревых токов в целом роторе оказывается возможным лишь при некоторых упрощениях его структуры и геометрии. Естественно, что при этом могут существенно сглаживаться локальные концентрации вихревых токов, обусловленные спецификой структуры и геометрии конструктивных узлов ротора и способные вызвать значительные местные нагревы. Поэтому задачи по исследованию вихревых токов в зонах их локальных концентраций приобретают самостоятельное и важное значение. В роторе турбогенератора к таким зонам относятся зоны поперечных канавок на большом зубе, зоны стыка пазовых клиньев и т.п. Концентрация вихревых токов в них существенно определяется их трехмерной структурой и, в зависимости от степени проявления поверхностного эффекта, нелинейными магнитными характеристиками роторной стали.

Для зон поперечных канавок и стыка пазовых клиньев в работе построены математические модели и исследованы вычислительные схемы расчета вихревых токов при анормальных режимах.

Приближенное решение граничной задачи по расчету вихревых токов в зоне поперечных канавок при слабом проявлении поверхностного эффекта строится на основе фундаментального решения уравнений Максвелла:

$$\dot{\delta}^{(n)} = \sum_{\nu=1}^{n} a_\nu \dot{\Gamma}^{(\nu)}\left(\dot{\Gamma}_x^{(\nu)}; \dot{\Gamma}_y^{(\nu)}; \dot{\Gamma}_z^{(\nu)}\right), \qquad (10)$$

где $\dot{\Gamma}_x^{(3\kappa-2)} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \beta^2\right)\Psi_\kappa$; $\dot{\Gamma}_y^{(3\kappa-2)} = \frac{\partial^2 \Psi_\kappa}{\partial x \partial y}$; $\dot{\Gamma}_z^{(3\kappa-2)} = \frac{\partial^2 \Psi_\kappa}{\partial x \partial z}$;

$\dot{\Gamma}_x^{(3\kappa-1)} = \frac{\partial^2 \Psi_\kappa}{\partial x \partial y}$; $\dot{\Gamma}_y^{(3\kappa-1)} = \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \beta^2\right)\Psi_\kappa$; $\dot{\Gamma}_z^{(3\kappa-1)} = \frac{\partial^2 \Psi_\kappa}{\partial y \partial z}$;

$\dot{\Gamma}_x^{(3\kappa)} = \frac{\partial^2 \Psi_\kappa}{\partial x \partial z}$; $\dot{\Gamma}_y^{(3\kappa)} = \frac{\partial^2 \Psi_\kappa}{\partial y \partial z}$; $\dot{\Gamma}_z^{(3\kappa)} = \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \beta^2\right)\Psi_\kappa$;

$\Psi_\kappa = \frac{1}{r(P_\kappa, P)} \exp\left[-\beta r(P_\kappa, P)\right]$; $r(P_\kappa, P) = \sqrt{(x_\kappa - x)^2 + (y_\kappa - y)^2 + (z_\kappa - z)^2}$;

$\beta^2 = -\omega^2 \varepsilon \mu + j\omega\mu\gamma$; $\nu = 3\kappa - i$; $\kappa = 1, 2, 3, \ldots$; $i = 0, 1, 2$.

Задачи для режимов с резким проявлением поверхностного эффекта формулируются в терминах скалярного магнитного потенциала $\dot{U}_м$ для ограниченной трехмерной области воздушного зазора, принадлежащей рассматриваемой зоне ротора. В качестве условия на граничной поверхности исследуемой области, соприкасающейся с поверхностью ротора $S_р$, используется рекомендованное К.С.Демирчяном условие

$$-\mu_0 \left.\frac{\partial \dot{U}_м}{\partial n}\right|_{S_р} = \left. div\left(\frac{1}{Z_\mu} grad\, \dot{U}_м\right)\right|_{S_р}, \qquad (11)$$

где Z_μ - волновое магнитное сопротивление массивных элементов ротора, определенное с учетом нелинейности их магнитных характеристик. Выполненные на электрических моделях исследования показали, что локальные концентрации вихревых токов в указанных зонах при несимметричных режимах с достаточной точностью можно находить из более простых, двухмерных граничных задач, в которых распределение $\dot{U}_м$ на поверхности ротора удовлетворяет уравнению

$$div\left(\frac{1}{Z_\mu} grad\, \dot{U}_м\right) = 0. \qquad (12)$$

В качестве источника поля здесь следует считать намагничивающую силу обмотки якоря, приложенную к границам исследуемой области.

Исследование распределения вихревых токов и обусловленных ими потерь в зонах поперечных канавок и стыка пазовых клиньев было выполнено для несимметричных режимов турбогенератора ТВВ-800-2.

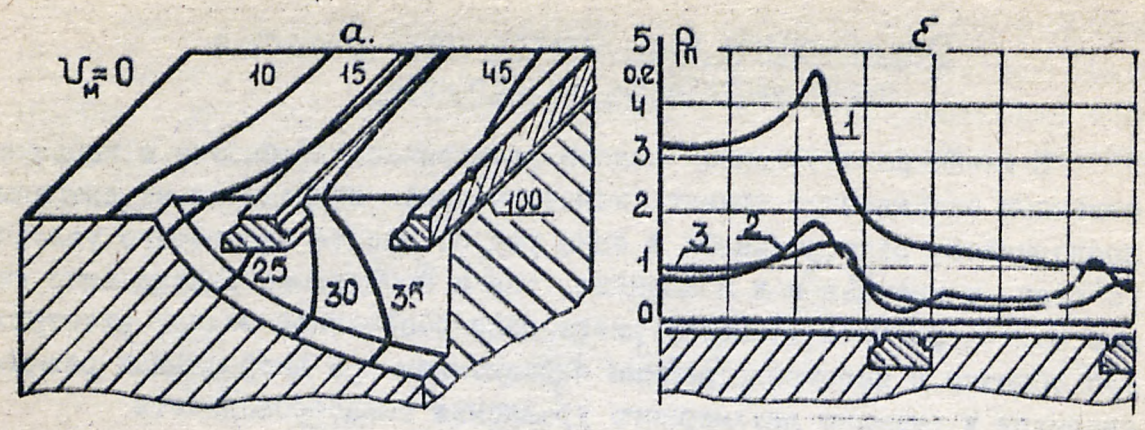


Рис.5. Картины распределения вихревых токов (а) и поверхностных потерь в зоне поперечной канавки с продольными демпферными клиньями. I - канавка без клиньев, 2 - с одним клином, 3 - с тремя клиньями .

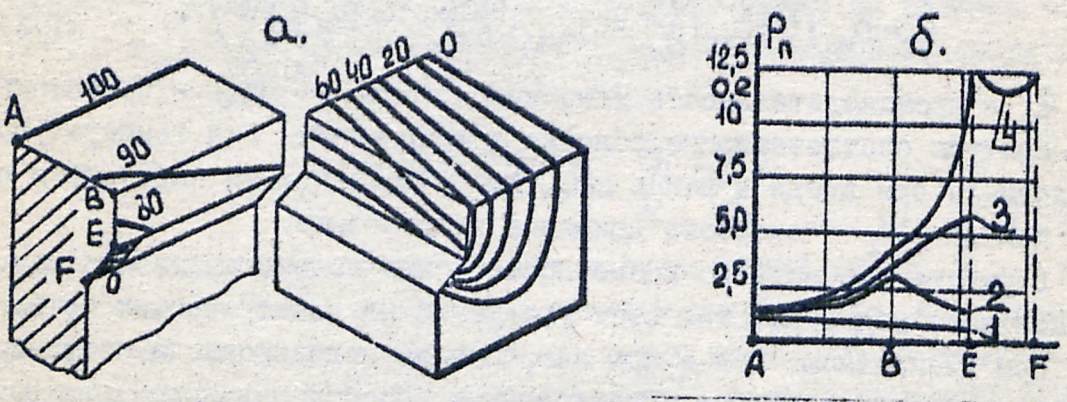


Рис.6. Картины распределения вихревых токов в зоне стыка дюралюминиевых пазовых клиньев (а) и поверхностных потерь по периметру зубца (б) .

4 - посередине стыка клиньев, 2,3 - на удалении от зоны стыка соответственно на 4 и 8мм; I - посередине клина .

В результате установлено влияние конструкции и электротехнических характеристик этих зон на уровень локальных концентраций вихревых токов и оценена эффективность применения продольных демпферных клиньев и демпферных прокладок под пазовые клинья в качестве меры по снижению выявленных концентраций.

Температурное поле электрических обмоток с непосредственным охлаждением

В качестве обобщенной модели электрической обмотки с непосредственным охлаждением принята конструктивная композиция из активных проводников, расположенных в один ряд по высоте некоторого условного паза, и имеющая как наклонные, так и продольные охлаждающие каналы. Задача расчета температурного поля обобщенной модели электрической обмотки с непосредственным охлаждением при анормальных режимах сводится к решению двухмерного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y}\right) + q_u - q_c = C_v \frac{d\theta}{dt} \qquad (13а)$$

совместно с уравнением нагревания в канале

$$q_c = \alpha_{oa}(\theta - \theta_{oa}) \frac{\Pi_к}{S_к} = C_{voa}\left(\frac{\partial \theta_{oa}}{\partial t} + W_\tau \frac{\partial \theta_{oa}}{\partial \tau}\right), \qquad (13б)$$

где q_u - производительность источников тепла; θ, θ_{oa} - превышения температуры соответственно обмотки и хладоагента над температурой последнего при входе в канал; $\Pi_к, S_к$ - эффективный периметр и сечение канала; W_τ - скорость движения хладоагента.

В работе рассмотрены возможности и предложены различные схемы совместного моделирования этих уравнений на электрических сетках как при дискретном, так и при непрерывном моделировании нестационарности теплового процесса. Предложенные способы моделирования движения и подогрева хладоагента в каналах существенно расширяют возможности электрических моделей как средства исследования температурных полей в электрических машинах.

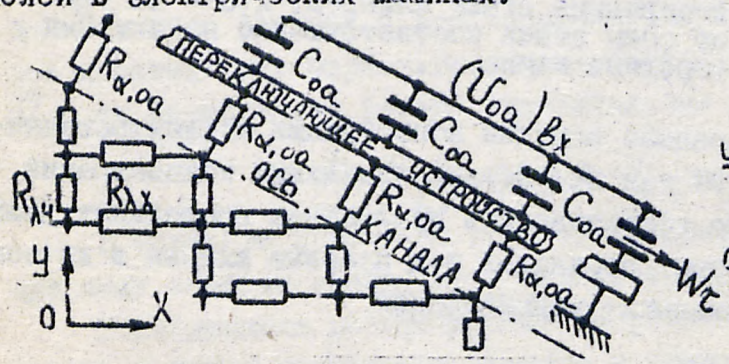


Рис.7. Электрическая схема для моделирования движения и нагревания хладоагента в канале обмотки при непрерывном моделировании нестационарности теплового процесса.

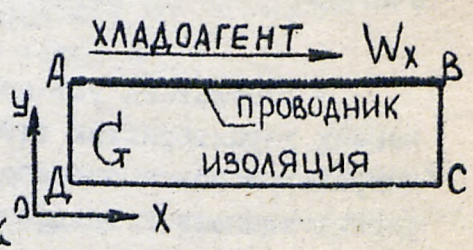


Рис.8. Вид исследуемой области для обмотки с продольными охлаждающими каналами.

Для обобщенной модели активного проводника обмотки с продольными охлаждающими каналами (рис.8) граничная задача расчета стационарного температурного поля в изоляции (G) формулируется, если пренебречь изменением температуры в плоскости поперечного сечения проводника, следующим образом:

$$\Delta\theta = 0 \qquad — \qquad в\ G\ , \tag{I4а}$$

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial x}\right|_{\substack{вс\\ лд}} = 0\ ; \qquad \left.\left(\frac{\partial\theta}{\partial y} - C_1\theta\right)\right|_{сд} = 0\ ; \tag{I4б}$$

$$\left.\frac{\partial\theta}{\partial y}\right|_{АВ} = \left.\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} - B\theta + C + Д\,\theta_{оа}\right)\right|_{АВ}\ , \tag{I4в}$$

где $A, B, C, C_1, Д$ - некоторые постоянные коэффициенты.

Поскольку такая задача не является классической, оказалось необходимым проанализировать вычислительную схему ее решения методом сеток. Показано, что достаточное условие разрешимости системы ее конечно разностных аналогов, имеет вид:

$$e^{-\frac{\alpha_{оа}\Pi_к}{C_{voa}W_т S_к}x_j} \geqslant \frac{q_o F_м \beta}{\alpha_{оа}\Pi_к}\ , \tag{I5}$$

где $\alpha_{оа}$ - коэффициент теплоотдачи в охлаждающий агент, q_o - удельная плотность джоулевых потерь при нулевой температуре, β - температурный коэффициент сопротивления, $F_м$ - сечение активного проводника. Для вычислительной схемы задачи стационарной теплопроводности предложен и реализован такой итерационный процесс, когда каждая итерация соответствует решению нестационарной задачи в соответствующие моменты времени.

Исследование стационарных температурных полей было выполнено для об..отки ротора с непосредственным водородным охлаждением. Получены оценки влияния на него различных факторов, необходимые для научного обоснования исходных предпосылок в инженерных методах тепловых расчетов таких обмоток. Исследование нестационарного температурного поля выполнено для обобщенной модели активного проводника при внезапном его нагружении током. Получены качественные и количественные оценки влияния скорости движения хладоагента и условий теплообмена в канале на пространственные и временные распределения температуры и ее локальных градиентов, определяющих термическую стойкость изоляции.

Температурное поле в роторе турбогенератора при анормальных режимах

Область исследования температурного поля ротора при анормальных режимах, показанная на рис. 9, ограничивается зубцовым делением, а его структура обобщает основные конструктивные исполнения и схемы охлаждения основных типов отечественных турбогенераторов. Краевая задача теплопроводности в такой обобщенной модели сводится при некоторых общепринятых допущениях к отысканию пространственно-временного распределения превышения температуры $\theta(x,y,z,t)$, удовлетворяющего внутри области уравнениям

$$\lambda \Delta\theta + q_u - q_c = C_v \frac{d\theta}{dt}, \qquad (16а)$$

$$q_c = \alpha_{oa}(\theta - \theta_{oa}) \frac{\Pi_к}{S_к} = C_{voa}\left(\frac{\partial\theta_{oa}}{\partial t} + W_к \frac{\partial\theta_{oa}}{\partial z}\right) \qquad (16б)$$

и известным граничным и начальным условиям.

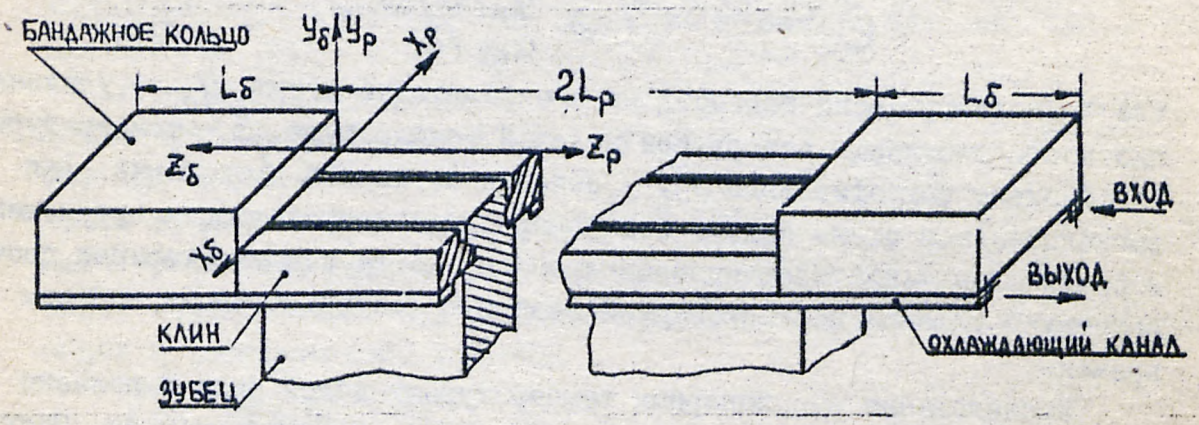


Рис. 9. Область исследования температурного поля ротора при анормальных режимах.

В качестве источников исследуемого поля здесь выступают удельные объемные потери на гистерезис и вихревые токи q_u. Производительность стока тепла q_c в движущейся в канале со скоростью $W_к$ хладагент с температурой θ_{oa} определяется в предположении, что температура стенок канала не изменяется по периметру его сечения.

Интегральным преобразованием

$$\theta_v(x,y,t) = \frac{2}{L}\int_0^L \theta(x,y,z,t)\cos\kappa_v z\, dz$$

трехмерная задача (I6) сводится к системе двухмерных

$$\lambda\left[\frac{\partial^2\theta_\nu}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_\nu}{\partial y^2}-K_\nu^2\theta_\nu\right]+q_{\nu u}-q_{\nu c}\pm\frac{2}{L}p_c=C_\nu\frac{d\theta_\nu}{dt}, \qquad (I7)$$

определяющих распределение амплитуд пространственных гармоник θ_ν, в плоскости поперечного сечения для каждой из структурно-однородных подобластей обобщенной модели зубцового деления. Чтобы организовать процедуры моделирования (I7), амплитуды $\theta_\nu(q_{\nu u};q_{\nu c};p_\delta)$ представляются в виде составляющих, отражающих способы посадки бандажного кольца и охлаждения поверхностного слоя ротора:

$$\theta_\nu=\theta_{\nu uв}(q_{\nu u})+\theta_{\nu uб}(p_{бu})+\theta_{\nu cв}(q_{\nu c})+\theta_{\nu cб}(p_{бc}), \qquad (I8)$$

где $\theta_{\nu uв}$, $\theta_{\nu cв}$ - составляющие, обусловленные внутренним тепловыделением $(\theta_{\nu uв})$ и стоком тепла в охлаждающий канал $(\theta_{\nu cв})$ и определенные без учета теплообмена между бочкой ротора и бандажом; $\theta_{\nu uб}$, $\theta_{\nu cб}$ - составляющие, обусловленные взаимными тепловыми потоками между бочкой ротора и бандажом соответственно с плотностями:

$$p_{бu}=\lambda_p\frac{\partial\theta_{up}}{\partial z_p}\Big|_{z_p=0}=-\lambda_\delta\frac{\partial\theta_{uб}}{\partial z_\delta}\Big|_{z_\delta=0}; \qquad (I9а)$$

$$p_{бc}=\lambda_p\frac{\partial\theta_{cp}}{\partial z_p}\Big|_{z_p=0}=-\lambda_\delta\frac{\partial\theta_{cб}}{\partial z_\delta}\Big|_{z_\delta=0}. \qquad (I9б)$$

Распределение выделенных составляющих амплитуд температурных гармоник в плоскости поперечного сечения каждой из подобластей определяется уравнениями

$$\lambda\left[\frac{\partial^2\theta_{\nu uв}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_{\nu uв}}{\partial y^2}-K_\nu^2\theta_{\nu uв}\right]+q_{\nu u}=C_\nu\frac{d\theta_{\nu uв}}{dt}; \qquad (20а)$$

$$\lambda\left[\frac{\partial^2\theta_{\nu uб}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_{\nu uб}}{\partial y^2}-K_\nu^2\theta_{\nu uб}\right]\pm\frac{2}{L}p_{бu}=C_\nu\frac{d\theta_{\nu uб}}{dt}; \qquad (20б)$$

$$\lambda\left[\frac{\partial^2\theta_{\nu cв}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_{\nu cв}}{\partial y^2}-K_\nu^2\theta_{\nu cв}\right]+q_{\nu c}=C_\nu\frac{d\theta_{\nu cв}}{dt}; \qquad (20в)$$

$$\lambda\left[\frac{\partial^2\theta_{\nu cб}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_{\nu cб}}{\partial y^2}-K_\nu^2\theta_{\nu cб}\right]\pm\frac{2}{L}p_{бc}=C_\nu\frac{d\theta_{\nu cб}}{dt}, \qquad (20г)$$

и известными граничными и нулевыми начальными условиями.

Отметим, что четырьмя составляющими в (20) будет определяться температура только в турбогенераторах серии ТЗВ, с водяным охлаждением поверхностного слоя ротора. Если положить $q_{\gamma c} = \rho_{бс} = 0$, а следовательно и $\theta_{\gamma cв} = \theta_{\gamma cб} = 0$, приходим к турбогенератору с газовым охлаждением поверхности ротора и непосредственной посадкой бандажа на бочку ротора. Если дополнительно положить $\rho_{би} = 0$ и $\theta_{\gamma иб} = 0$, приходим к ротору с отставленным бандажом. Таким образом возникает возможность унифицировать методику моделирования и расчета температурного поля ротора при анормальных режимах для всех основных типов отечественных турбогенераторов.

В преобразованных уравнениях теплопроводности (20) известными источниками тепла являются $q_{\gamma и}$, что делает невозможным прямое моделирование (20 б,в и г). В работе рассмотрены процедуры и предложены методы расчета $\rho_{би}$, $q_{\gamma c}$ и $\rho_{бс}$ и моделирования на электрических сетках раздельно всех составляющих θ_{γ}. Результаты моделирования представлены в обобщенном виде и могут быть многократно использованы при расчете температурного поля роторов различных типов турбогенераторов. Разработан алгоритм и составлена программа расчета трехмерного нестационарного температурного поля обобщенной модели ротора по результатам моделирования θ_{γ}. Помимо трехмерной обобщенной модели ротора в работе эффективно используется и двухмерная модель, определяющая температурное поле в плоскости продольной симметрии зубца и позволяющая наиболее полно учесть геометрию и структуру бандажного узла в аксиальном направлении.

В работе приводятся и обсуждаются результаты обширных расчетно-теоретических исследований температурных полей при кратковременных и установившихся несимметричных режимах в рсторах различных типов отечественных турбогенераторов. Выявлены характерные особенности этих полей в отдельных конструктивных элементах и установлено влияние на них конструкции активной зоны и бандажного узла, электро - и теплофизических характеристик материалов, условий и способов охлаждения поверхностного слоя ротора. Установлены границы изменения тепловых контактных сопротивлений между элементами зубцового слоя, в пределах которых их влиянием можно пренебречь в практических тепловых расчетах. Выявлена сравнительная эффективность водяного охлаждения зубцового слоя и бандажного кольца ротора.

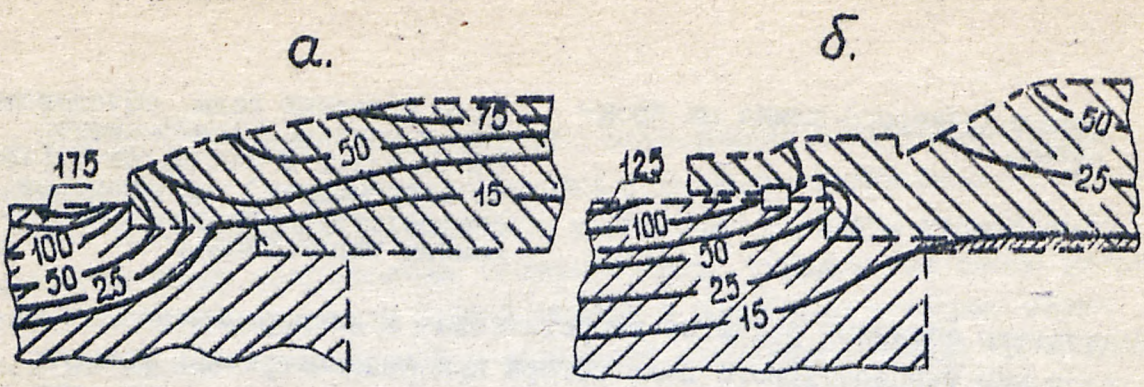


Рис. I0. Картины температурного поля в бандажных узлах роторов ТГВ-I200 (а) и ТВВ-I200-2 (б) через I2 сек. после возникновения несимметричного режима с кратностью тока обратной последовательности $I_2 = 0{,}75$

Получены качественные и количественные оценки чувствительности температурного поля к изменению магнитной проницаемости зубцов, электропроводности клиньев, контактных сопротивлений, параметров и схемы охлаждения, позволяющие прогнозировать различные конструктивные и технологические мероприятия по повышению термической стойкости роторов к несимметричным режимам и оценивать их эффективность.

Чувствительность температурного поля к изменению отмеченных факторов оценивается величиной относительного изменения превышения температуры

$$\Delta\vartheta(x,y,z,t) = \frac{\theta_{\varphi 1} - \theta_{\varphi 2}}{\theta_{\varphi 1}}, \qquad (2I)$$

обусловленного изменением характеристик некоторого из факторов от значения $\varphi 1$ до значения $\varphi 2$ при прочих равных условиях.

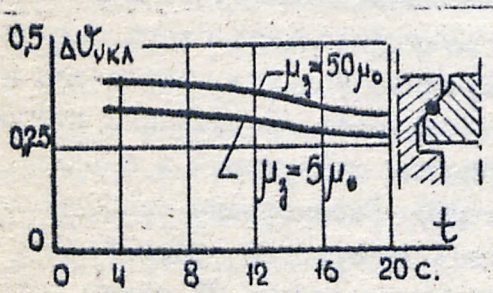


Рис. II. Относительное изменение превышения температуры контактной площадки на торце ротора ТВВ-320-2 с отставленным бандажом, обусловленное заменой

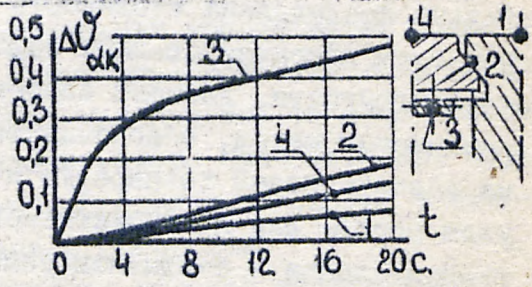


Рис. I2. Относительное изменение превышения температуры характерных точек зубцового слоя ротора ТЗВ-800-2, расположенных в 40 см от торца по

дюралюминиевого клина на бронзовый.

ходу движения воды, обусловленные изменением коэффициента теплоотдачи в канале от 0 (вода отсутствует) до значения, соответствующего реальным условиям теплообмена.

Результаты обширных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований температурного поля ротора при несимметричных режимах сопоставляются для отечественных турбогенераторов серий ТВВ, ТГВ и ТЗВ, мощностью от 200 до 800 МВт. Сопоставление результатов свидетельствует о достаточной для практических целей полноте разработанных математических моделей исследуемых электромагнитных и тепловых полей и приемлимом уровне погрешностей, возникающих при их моделировании.

Термоупругие напряжения и деформации в бандажном узле ротора турбогенератора

Математическая модель взаимосвязанных полей температур и термоупругих деформаций в бандажном узле ротора относится к таким эксплуатационным режимам и технологическим операциям, когда эти поля, в порядке допущения, можно считать осесимметричными, и представляет собой систему краевых задач теплопроводности и термоупругости, сформулированных соответственно относительно превышений температуры $\theta(\rho,z,t)$, радиальных $u_\rho(\rho,z,t)$ и осевых $u_z(\rho,z,t)$ термоупругих смещений. В исследуемую область включаются бочка ротора и бандажное кольцо, с учетом схемы их сопряжения. Экспериментально исследована сходимость вычислительных схем решения разностных схем сформулированных задач. Для вычислительной схемы задачи термоупругости, имеющей связанные граничные условия, предложен и реализован метод, обеспечивающий ее сходимость. Составлена программа расчета полей температур и термоупругих деформаций в бандажном узле ротора для конструктивной схемы ТГВ. Рассмотрены особенности распределения в бандажном узле тепловых деформаций, возникающих в процессе технологической посадки бандажного кольца на бочку ротора, а также при кратковременном несимметричном режиме. Выявлен характер распределения термоупругих деформаций и напряжений по объему бандажного кольца и на его посадочных поверхностях. Обнаружено значительное влияние консольной посадки бандажного кольца на величину и распределение термоупругих напряжений и деформаций, особен-

но в зоне посадочных поверхностей. Возникающие в кратковременных несимметричных режимах термоупругие радиальные напряжения на посадочных поверхностях способствуют уменьшению величины нормального давления между сопряженными поверхностями, ухудшая тем самым электрические контакты между бочкой ротора и бандажным кольцом. Радиальные смещения посадочной поверхности бандажного кольца не превосходят величин натягов, предусмотренных технологическими нормами, если кратность тока обратной последовательности близка к единичной.

Заключение

Настоящая работа в основном решает научную проблему комплексных расчетно-теоретических исследований взаимосвязанных физических полей и процессов, определяющих термическую стойкость элементов и узлов ротора мощных отечественных турбогенераторов при анормальных режимах. Решение этой проблемы включает в себя в качестве методологической основы разработку системы математических моделей и методов моделирования соответствующих физических полей. Основные положения выполненных целенаправленных методологических разработок имеют и самостоятельное значение, поскольку могут быть использованы для исследований физических полей и процессов в электрических машинах других типов или конструктивных модификаций. Выполненные расчетно-теоретические исследования в основном направлены на выявление общих закономерностей и специфических особенностей пространственно-временного распределения взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и термомеханических полей в роторе турбогенератора при анормальных режимах. Результаты исследований представляют собой научную основу для прогнозирования и технико-экономического обоснования конструкторско-технологических мероприятий по обеспечению термической стойкости элементов и узлов ротора отечественных турбогенераторов при анормальных режимах. Основные положения и выводы диссертационной работы заключаются в следующем.

Общая характеристика математических моделей исследуемых полей.

Математические модели для исследования взаимосвязанных физических полей, опередляющих термическую стойкость ротора турбогенератора в анормальных режимах, разрабатывались применительно к численным математическим методам решения полевых задач, реализуемым с помощью вычислительной техники. Это позволило существенно

повысить их полноту по сравнению с другими, известными моделями подобного рода. Главное отличие разработанных математических моделей заключается в наиболее полном учете конструктивных особенностей элементов и узлов ротора, - реальной их геометрии, структуры и условий сопряжения, - которые наиболее существенно влияют на распределение полей, особенно в тех локальных зонах, повышенная интенсивность физических процессов в которых определяет допустимые условия режима. Взаимозависимость физических полей и зависимость характеристик материалов от интенсивности процессов учитывается в тех случаях, когда влияние отмеченных обстоятельств оказывается существенным. Математические модели, разработанные для исследования тепловых полей в массивных элементах ротора и в изоляции электрических обмоток турбогенераторов при анормальных режимах, обобщают основные конструктивные исполнения и схемы охлаждения отечественных машин. В результате оказывается возможным унифицировать процедуры исследования этих полей в турбогенераторах различных конструктивных модификаций.

Методы математического моделирования физических полей, используемые и развиваемые в настоящей работе, базируются преимущественно на математическом методе сеток и реализуется на электрических аналоговых моделях и ЭВМ. Включение в структуру аналоговых моделей общего назначения, выпускаемых отечественной промышленностью, дополнительных элементов из емкостей, индуктивностей, микротрансформаторов и автоматических переключающих устройств позволило существенно расширить их технические возможности для исследования электромагнитных и тепловых полей в электрических машинах. В развитие практических методов электрического и численного моделирования физических полей в настоящей работе:

- предложены и разработаны общие и частные методы моделирования переменного электромагнитного поля в пазах электрических машин с нетранспонированными проводниками, практические методы раздельного моделирования трехмерных составляющих векторного потенциала в задачах по исследованию переменного электромагнитного поля в торцовых зонах электрических машин, практические методы моделирования на электрических сетках движущегося хладагента в охлаждающих каналах обмоток с непосредственным охлаждением, упрощенные методы моделирования вихревых токов в локальных зонах ротора при режимах, характеризующихся резким проявлением поверхностного эффекта;

-обобщены методы и унифицирована структура электрических сеток для моделирования тангенциальных вихревых токов в зубцовом слое в бандажном узле ротора турбогенератора с учетом контактных сопротивлений и обмотки возбуждения ;

- разработаны и унифицированы методы и практические процедуры моделирования на плоских сетках преобразованных уравнений теплопроводности для трехмерной модели ротора ;

- исследовано влияние вида граничных условий для трехмерных составляющих векторного потенциала на сходимость итерационных процессов расчета электромагнитного поля в торцовых зонах электрических машин. Предложен способ, обеспечивающий сходимость итерационного процесса при связанных граничных условиях ;

- рассмотрена и обоснована вычислительная схема приближенного расчета переменного, существенно трехмерного электромагнитного поля в зоне поперечной канавки ротора, использующая фундаментальные решения уравнений Максвелла ;

- рассмотрены вычислительные схемы решения методом сеток краевых задач теплопроводности для электрических обмоток с продольными охлаждающими каналами. Предложен такой способ организации итерационного процесса стационарной краевой задачи теплопроводности, что каждая итерация соответствует решению нестационарной задачи в соответствующие моменты времени ;

- теоретически обобщены применительно к кратковременным несимметричным режимам результаты моделирования на электрических сетках преобразованных уравнений теплопроводности для роторов трубогенераторов. Разработаны алгоритмы и составлена универсальная программа расчета по этим результатам трехмерного температурного поля в роторах основных типов отечественных трубогенераторов ;

- исследована сходимость вычислительной схемы решения совместных краевых задач теплопроводности и термоупругости для бандажного узла ротора турбогенератора методом сеток. Рассмотрены и реализованы способы по обеспечению сходимости решения.

Основные научные и практические результаты расчетно-теоретических исследований физических полей в турбогенераторах. Комплексные расчетно-теоретические исследования взаимосвязанных физических полей, определяющих термическую стойкость ротора турбогенератора при анормальных режимах были в основном выполнены применительно к кратковременным несимметричным режимам, при которых массивные элементы

ротора подвергаются наиболее опасным термическим воздействиям и которые, в силу этого оказываются наиболее важными при выборе конструкции и материалов ротора. Электромагнитные, тепловые и термомеханические поля, одновременно возникающие в роторе при таких режимах, исследовались для отечественных типов турбогенераторов - ТВВ, ТГВ и ТЗВ.

Исследования электромагнитных полей в турбогенераторах при несимметричных режимах выявили специфические особенности их распределения в отдельных элементах и узлах ротора. Получены качественные и количественные оценки влияния конструкции, материалов, насыщения зубцов и контактных сопротивлений на распределение вихревых токов в роторе. Определены локальные концентрации вихревых токов в бочке ротора. Установлена роль и влияние конструктивных элементов бандажного узла ТВВ-1200-2 в качестве токопроводов, разгружающих торцовую зону бочки ротора от тангенциальных вихревых токов.

Исследования температурных полей роторов основных типов отечественных турбогенераторов в кратковременных и длительных несимметричных режимах выявили характерные их особенности в отдельных конструктивных элементах и влияние на них конструкции активной зоны и бандажного узла, характеристик материалов, контактных сопротивлений и способов охлаждения ротора. Установлены влияние и роль различных видов теплопередачи на нагревание наиболее горячих зон бочки ротора и бандажного узла. Получены качественные и количественные оценки чувствительности температурного поля ротора к изменению магнитной проницаемости стали зубцов, электро- и температурных клиньев, контактных сопротивлений и параметров системы охлаждения, позволяющие прогнозировать различные конструктивные и технологические мероприятия по повышению термической стойкости роторов к несимметричным режимам и оценивать их эффективность. При существующих нормах на допустимые температуры термическая стойкость к несимметричным режимам основных конструктивных элементов бандажных узлов мощных отечественных турбогенераторов с водородным охлаждением оказывается примерно одинаковой. Термическая стойкость ротора в целом определяется стойкостью зубцов его бочки и зависит от условий нагревания их локальных зон со значительными концентрациями вихревых токов. В кратковременных несимметричных режимах водяное охлаждение поверхностного слоя ротора по схеме ТЗВ обеспечивает более благоприятные, чем при водородном охлаждении, условия нагревания подклиновой и подбандажной изоляции, но несколько

худшие - для наружных поверхностей зубца и бандажного кольца. Эффективность водяного охлаждения наружной поверхности бочки ротора в длительных несимметричных режимах существенно определяется теплопроводностью пазовых клиньев ротора и при дюралюминиевых клиньях оказывается выше водородного.

Термоупругие деформации и напряжения, возникающие при несимметричных режимах, сложным образом распределяются по объему бандажного кольца и бочки ротора и изменяются с течением времени. Взаимное влияние бочки ротора и бандажного кольца на термоупругие деформации и напряжения оказывается особо существенным в зоне их сопряжения. Радиальные термоупругие напряжения, возникающие в кратковременных несимметричных режимах на посадочных поверхностях бочки ротора и бандажа, способствуют уменьшению нормального давления между контактирующими поверхностями и ухудшению электрического контакта между ними. При кратностях тока обратной последовательности, близких к единичным, возникающие радиальные смещения посадочных поверхностей бандажного кольца не превосходят величин натягов, предусмотренных технологическими нормами.

Распределение тепловых деформаций, возникающих в бандажном узле ротора при технологической посадке бандажного кольца в процессе его изготовления, оказывается неравномерным по всему его объему. В зоне посадочных поверхностей наблюдаются пластические деформации.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

I. Алексидзе М.А., Демирчян К.С., Попов В.В. К расчету распределения вихревых токов ротора современного трубогенератора в зоне канавок Лаффуна при несимметричных режимах. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1977, № I, с.I0I-I09.

2. Алексидзе М.А., Пертая К.В., Попов В.В. Исследование влияния вида граничных условий на сходимость численного расчета трехмерного магнитного поля методом сеток. - Известия ВУЗов, Электромеханика, I978, № I2, с.I28I-I290.

3. Алексидзе М.А., Попов В.В. Расчет температурного поля электрических обмоток с непосредственным охлаждением. - Известия ВУЗов, Электромеханика, I977, № 4, с.376-38I.

4. Арсеньев И.А., Косачевский В.И., Попов В.В. Исследование электротепловых полей в зоне поперечных канавок ротора трубогенератора при несимметричных режимах. Электротехника, 1980, № 2, с.53-55.

5. Блехтер Д.Н., Косачевский В.И., Попов В.В. Исследование электромагнитных и тепловых полей в зоне стыка пазовых клиньев ротора турбогенератора при несимметричных режимах. - Электротехника, 1981, № 3, с.47.

6. Брынский Е.А., Данилевич Я.Б., Попов В.В., Чернышев Н.Н. Влияние конструкции бандажного узла ротора мощного турбогенератора на электромагнитное и тепловое поля торцевой зоны при несимметричной нагрузке. - Электротехника, 1976, № 7, с.26-29.

7. Брынский Е.А., Журавлева Т.Е., Попов В.В., Смолин И.М. Расчет нестационарных электромагнитного и теплового полей толстостенной оболочки. - Труды республиканского научно-технического семинара, Киев, 1977.

8. Брынский Е.А., Косачевский В.И., Попов В.В., Чернышев Н.Н. Исследование температурного поля ротора турбогенератора при несимметричных нагрузках. - Электротехника, 1973 № 9, с.46-49.

9. Брынский Е.А., Малиновский С.С., Попов В.В., Чернышев Н.Н. Влияние непосредственной посадки бандажа на температурное поле торцовой зоны. - В кн.Исследование турбо- и гидрогенераторов. Л., Наука, 1976, с.3-12.

10. Брынский Е.А., Малиновский С.С., Попов В.В. Влияние водяного охлаждения зубцовой зоны и бандажного узла ротора турбогенератора на тепловое поле при несимметричных режимах - Электротехника 1977, № 7, с.20-22.

11. Брынский Е.А., Малиновский С.С., Попов В.В., Чернышев Н.Н. Исследование на математической модели температурного поля ротора мощного турбогенератора в зоне стыка пазовых клиньев при несимметричных режимах. - Электроэнергетика, труды ЛПИ, 1976, № 350,с.75-80.

12. Брынский Е.А., Попов В.В. Влияние водяного охлаждения зубцовой зоны и бандажного узла ротора турбогенератора на тепловое поле при несимметричных режимах. - Киев, II республиканская научно-техническая конференция: Современные проблемы энергетики, 1976, с.32-34.

I3. Брынский Е.А., Попов В.В. Исследование распределения потерь и тепловых полей в торцевой зоне ротора турбогенератора при несимметричных режимах. - Л., ВНИИЭлектромаш. 1975 Деп. в ОВНИИЭМ 23 марта 1976, № 47 - д/76, 20 с.

I4. Брынский Е.А., Попов В.В. Тепловое состояние роторов современных турбогенераторов при несимметричных режимах. - Л., ЦПНТОЭЭП. Краткие тезисы докладов к всесоюзному научно-техническому совещанию "Проблемы развития тяжелого электромашиностроения для энергетики", 1975, с.37-43.

I5. Брынский Е.А., Попов В.В., Хозиков Ю.Ф., Чернышев Н.Н. Исследование электромагнитных полей, потерь, местных нагревов и деформаций роторов турбогенераторов при работе в несимметричных режимах. - Л., 1974, 21 с. Рукопись представлена ВНИИЭлектромаш. Деп.в ВИНИТИ 13 авг. 1975. № 22-Н/59.

I6. Брынский Е.А., Попов В.В., Чернышев Н.Н., Шмаков В.В. Исследование влияния электротехнических и теплотехнических характеристик материалов трубогенератора на его нагрев при несимметричных режимах. - Труды ЛПИ, 1979, № 367, с.37-39.

I7. Важнов А.И., Герасимова Г.Н., Демирчян К.С., Попов В.В. Исследование электромагнитного поля в синхронных машинах с массивными полюсами с помощью сеточной модели. - Сб. "Основные тенденции в проектировании новых машин и аппаратов", ЛПИ им.М.И.Калинина, 1966 с.5-13.

I8. Важнов А.И., Кириллов С.А., Попов В.В. Математическое моделирование температурных полей в массивных роторах мощных электрических машин - Л. ЛПИ им.М.И.Калинина, 1968, тезисы доклада на НТС с.57-58.

I9. Важнов А.И., Гуревич В.И., Попов В.В., Филиппов И.Ф., Чернышев Н.Н. Исследование температурного поля ротора мощного турбогенератора на аналоговых моделях. - Сб. "Турбогенераторы и синхронные компенсаторы". Л. ВНИИЭлектромаш, 1970.

20. Важнов А.И., Звиедрис А.П., Попов В.В. Хуторецкий Г.М. К вопросу о несимметричных режимах работы турбогенераторов. - Сб. "Турбогенераторы и синхронные компенсаторы", Л., ВНИИЭлектромаш, 1970.

2I. Важнов А.И., Герасимова Г.Н., Демирчян К.С., Попов В.В. Использование сеточных моделей для исследования параметров элект-

рических машин с учетом вихревых токов в массивном роторе. -Труды ЛПИ, 1966, № 273, с.73-79.

22. Важнов А.И., Звиедрис А.П., Попов В.В. Вихревые токи и параметры турбогенератора при несимметричных режимах. - Свердловск. Тезисы докладов межвузовской конференции, УПИ, 1969.

23. Важнов А.И., Герасимова Г.Н., Демирчян К.С., Попов В.В. Параметры массивного ротора неявнополюсной синхронной машины. - Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1967, № 2, с.86-93.

24. Важнов А.И., Герасимова Г.Н., Демирчян К.С., Попов В.В. Параметры массивного ротора явнополюсной синхронной машины. - Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1968, № 3, с.53-60.

25. Важнов А.И., Виноградов С.Е., Герасимова Г.Н., Демирчян К.С., Попов В.В. Магнитное поле в зазоре неявнополюсной синхронной машины при асинхронном вращении ротора. - Труды ЛПИ, 1969, № 301, с.3-10.

26. Важнов А.И., Дроздова Л.А., Иванов Ю.Я., Макарова Л.В., Попов В.В., Суханов В.В., Хуторецкий Г.М., Чернышев Н.Н. Исследование электромагнитных и температурных полей ротора турбогенератора ТВВ-1200-2 при несимметричных режимах работы. - Электротехника, 1978, № 5, с.16-18.

27. Важнов А.И., Звиедрис А.П., Попов В.В. Потери в роторе турбогенератора от токов обратной последовательности. - Л., ЛПИ им.М.И.Калинина, 1968, тезисы доклада на НТК, с.54-55.

28. Важнов А.И., Звиедрис А.П., Попов В.В. Исследование на математической модели потерь в роторе турбогенератора от токов обратной последовательности. - Кн. Трубогенераторы большой мощности и перспективы их развития. Л., Наука, 1969, с.135-145.

29. Важнов А.И., Звиедрис А.П., Попов В.В. Потери в роторе турбогенератора при несимметричных режимах. - Электротехника. 1971, № 1, с.2-4.

30. Важнов А.И., Кириллов С.А., Попов В.В. Стационарное тепловое поле в пазу ротора турбогенератора. - Электротехника, 1967, № 1 с.16-19.

31. Важнов А.И., Кириллов С.А., Попов В.В. Моделирование нестационарного нагрева роторов мощных турбогенераторов. - Электротехника, 1970, № 1, с.33-36.

32. Важнов А.И., Попов В.В., Чернышев Н.Н.

33. Важнов А.И., Попов В.В., Токов М.И. Магнитное поле якоря в зазоре явнополюсной машины с массивным ротором в асинхронных режимах. - Электричество, 1969, № 10, с.54-58.

34. Герасимова Г.Н., Демирчян К.С., Попов В.В. Учет влияния обмотки возбуждения при моделировании плоскопараллельного вихревого поля синхронных машин на сеточной модели. - Л., Труды ЛПИ № 301, 1969 с.18-23.

35. Гуревич В.И., Попов В.В., Чернышев Н.Н. Моделирование температурного поля обмотки возбуждения турбогенераторов с форсированными способами охлаждения. - Л., ЛПИ им.М.И.Калинина, 1968, тезисы доклада на НТК, с.59-60.

36. Журавлева Т.Е., Попов В.В., Смолин И.М. Некоторые результаты исследования нестационарных электромагнитного и теплового полей толстостенных оболочек. - В кн. Электрические машины. Исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов. Л., ВНИИЭлектромаш, 1977, с.38-42.

37. Демирчян К.С., Попов В.В. Практическая реализация метода раздельного моделирования трехмерных составляющих векторного потенциала на примере моделирования магнитного поля в торцовой зоне электрической машины. - Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1978, № 4, с.85-89.

38. Попов В.В. Моделирование плоскопараллельного вихревого поля в областях с распределенными электрическими обмотками на электрических сетках. - Труды ЛПИ, 1969, № 301, с.24-31.

39. Попов В.В. Моделирование граничных условий трехмерного векторного потенциала. - Известия ВУЗОВ, Электромеханика, 1973, № 9, с.937-943.

40. Попов В.В. Моделирование и расчет нагрева ротора турбогенератора с неизолированной посадкой бандажа в несимметричных режимах. - Известия Вузов. Электромеханика, 1975, № 3, с.281-290.

41. Попов В.В. Моделирование и расчет температурного поля ротора трубогенератора с полным водяным охлаждением при несимметричных режимах. - Известия ВУЗов, Энергетика, 1979, № 9, с.15-20.

42. Попов В.В. К вопросу о нагревах активной зоны ротора турбогенератора в анормальных режимах. - Известия ВУЗов, Энергетика, 1979, № 11, с.3-7.

43. Попов В.В. Исследование на математической модели распределения вихревых токов в зоне поперечных канавок ротора турбоге-

нератора при несимметричных режимах. - Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979, № 6, с.156-159.

44. Попов В.В. Моделирование распределения тангенциальных вихревых токов в роторе турбогенератора. - Труды ЛПИ, 1979, № 367, с.29-33.

45. Попов В.В. К расчету распространения электромагнитной волны в пазах электрической машины с плоскими проводниками. - Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1980, № 6, с.104-108.

46. Попов В.В., Алексидзе М.А. К расчету нестационарного температурного поля электрических обмоток с непосредственным охлаждением. - Известия ВУЗов, Электромеханика, 1978, № 5 с.518-526.

47. Попов В.В., Вайнбрандт М.М. Моделирование и расчет нагрева обмоток электрических машин с непосредственным охлаждением. - Электротехника, 1973, № 8, с.40-44.

48. Попов В.В., Микиртичев А.А., Чернышев Н.Н. Исследование температурного поля обмотки ротора турбогенератора с непосредственным газовым охлаждением. - Электротехника, 1971, № 9, с.23-26.

49. Попов В.В., Пертая К.В. Решение граничной задачи термоупругости для бандажного узла ротора турбогенератора. - Вопросы вычислительной техники и управления. Мицниереба, 1978, с.92-110.

50. Попов В.В., Суханов В.В. К вопросу о формулировках трехмерных граничных задач по расчету электромагнитного поля турбогенераторов. - В кн. Электрические машины. Л., ВНИИЭлектромаш. 1980, с.37-46.

Подписано к печати 10.02.81 М - 28750
Заказ 194. Тираж 100 Бесплатно

Отпечатано на ротапринте Ленинградского политехнического
институ та имени М.И.Калинина
195251,Ленинград,Политехническая ул.,29

БЕСПЛАТНО

Б-166725