

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

КУШНИР СЕРГЕЙ СТАНИСЛАВОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
И КОНТРОЛЯ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕРДЕЧНИКА
СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Специальность 05.09.01 - Электрические машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993.



00803172 (L)

Робота виконана в Інституті електродинаміки АН України.

Научний керівник

- доктор технічних наук
Титко А.І.

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук
професор
Богаєнко І.Н

- кандидат технічних наук
Ворукаєв З.Х.

Ведуча організація

- ПО "Електротязмаш"
г. Харків

Захист состоится "12" мая 1993 г.
в 11 час. на засіданні спеціалізованого ученого совета
Д.016.30.04 при Інституті електродинаміки АН України
/252680, г.Київ-57, проспект Перемоги, 56, тел. спецсовета
446-91-15/.

О дисертації можна ознайомитися в бібліотека
Інституту електродинаміки АН України.

Автореферат розослан "7" апреля 1993г.

Учений секретар
спеціалізованого
ученого совета
доктор технічних наук

Г.М. Федоренко
ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ. Развитие электроэнергетики в настоящее время представляется одним из наиболее важных направлений хозяйствования Украины. При этом предусматривается наращивание мощностей, в первую очередь, тепловых (ТЭС, ТЭЦ), гидравлических (ГЭС) и гидроаккумулирующих (ГАЭС) электростанций. В связи с этим возникает необходимость обеспечения надежности и высокой нагрузочной способности основного электрогенерирующего оборудования как на тепловых и гидравлических, так и на успешно эксплуатирующихся атомных (АЭС) электростанциях.

Опыт эксплуатации мощных турбогенераторов (ТГ), как составляющих энергетических агрегатов большой мощности, в связи с колебаниями энергопотребления в течение суток и недели, работающих в режимах переменных нагрузок, выявил следующие недостатки конструкции:

- изменяется плотность запрессовки активной стали сердечника статора, ослабляется крепление магнитопровода сердечника статора и лобовых частей обмотки статора;

- повышается износ изоляции обмотки статора вследствие циклических взаимных перемещений обмотки и сердечника;

- ослабляются клиновка обмотки в пазах и бандажировка лобовых частей;

- при работе с циклически изменяющейся реактивной мощностью генератора действия термических напряжений и электродинамических сил приводят к распушке крайних пакетов магнитопровода.

Все эти недостатки приводят к снижению эксплуатационной надежности турбогенераторов, а соответственно к увеличению продолжительности и стоимости ремонтных простоев, потерям электроэнергии. Кроме того, существенная неравномерность электромагнитного и теплового нагружения конструктивных узлов ТГ, в частности узлов концевой зоны, имеющая тенденцию к возрастанию с повышением единичной мощности, приводит к значительному ограничению энергетических характеристик генераторов.

Обеспечение нагрузочной способности элементов концевой зоны турбогенератора, в частности крайнего пакета сердечника статора, в современных условиях эксплуатации может внести значительный

вклад в повышение экономической эффективности ТГ в режимах с переменными нагрузками. Эта задача должна быть решена путем создания и использования соответствующих методов и средств, начиная с этапа научных исследований и проектирования новой машины и заканчивая этапом вывода ее из эксплуатации после полной отработки фактического суммарного ресурса. Решение этой задачи должно включать:

1. Построение и расчет математической модели, анализ распределения электромагнитного поля в области крайних пакетов сердечника статора и определение причин его локальной концентрации;

2. Создание новых конструкций крайних пакетов и других узлов в области торца сердечника статора, существенно повышающих эксплуатационную надежность и нагрузочную способность ТГ путем снижения неравномерности распределения электромагнитного поля, а соответственно тепловых и механических нагрузок в этой области;

3. Создание методов и технических средств контроля и ранней диагностики состояния прессовки крайних пакетов и механических напряжений в элементах, передающих давление прессовки.

Все три основных направления взаимосвязаны, и только совместные исследования могут обеспечить решение задачи повышения эксплуатационной надежности и нагрузочной способности ТГ путем улучшения этих характеристик в элементах конструкции крайних пакетов сердечника статора. При этом необходим комплексный подход, заключающийся в создании новых конструкций, имеющих запас по механическим и электромагнитным нагрузкам, разработке и создании способов и технических средств контроля и диагностики в процессе изготовления, непосредственно во время работы и при периодическом обслуживании и ремонте турбогенератора.

Работа выполнена в соответствии с планами НИР Института электродинамики АН Украины, регламентированными постановлениями ГКНТ СМ СССР N 147 от 13.05.1986 и Президиума АН УССР N 471 от 27.12.1985 и N 01327 от 26.06.1986.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью диссертационной работы является разработка средств и методов обеспечения нагрузочной способности статора турбогенератора, а именно разработка предложений по исполнению высокоэффективных конструкций сердечника статора на этапе проектирования, способов и устройств их контроля в

процессе эксплуатации и ремонта.

В соответствии с поставленной целью задачей диссертационной работы является:

- разработка методики расчета и построение математической модели с целью анализа электромагнитного поля на торце сердечника статора в различных режимах нагрузки ТГ с учетом тангенциальной неравномерности конструкции магнитопровода и обмотки, разработка предложений по исполнению крайних пакетов сердечника статора с повышенной нагрузочной способностью;

- разработка физических моделей для исследований процессов распрессовки и повреждения межлистовой изоляции в пакетах сердечника статора ТГ, разработка методик и способов контроля состояния прессовки, нарушений межлистовой изоляции и повреждения стяжных призм сердечника статора;

- разработка системы контроля и прогнозирования теплового состояния узлов ТГ в маневренных режимах работы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования включают общие методы анализа электромагнитных полей с использованием уравнений Максвелла в макроскопической форме и численное моделирование электромагнитных полей с помощью метода конечных элементов. Экспериментальные исследования основаны на применении физического моделирования электромагнитных процессов в торцевой части сердечника статора ТГ и деградационных явлений в крайних пакетах.

НА ЗАЩИТУ выносятся следующие положения:

- методика расчета аксиальных магнитных полей на торце сердечника статора ТГ с учетом тангенциальной неравномерности;

- результаты исследований магнитного поля в крайних пакетах сердечника статора ТГ;

- способ исполнения сердечника статора с пониженными уровнями аксиальных полей на торце крайнего пакета и достаточной механической прочностью шихтованного сердечника;

- способ, датчик и алгоритм контроля межлистовых замыканий в сердечнике статора;

- способ, датчик и алгоритм контроля состояния локальной прессовки пакетов сердечника статора ТГ;

- способ контроля повреждений стяжных призм.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы состоит в том, что

- предложена математическая модель торцевой части мощного ТГ, учитывающая в комплексе зубцово-пазовую конструкцию крайних пакетов, дискретное распределение стержней обмотки сердечника статора и магнитное состояние зубцов сердечника;

- предложен новый метод снижения величины аксиального потока на поверхности крайних пакетов сердечника статора, основанный на изменении геометрии пазов крайних пакетов;

- предложен индукционный метод контроля прессовки пакетов сердечника статора ТГ, основанный на зависимости величины поперечного потока от усилий прессовки, учитывающий шероховатость поверхности сердечника в месте установки датчика.

- предложен метод контроля межлистовых замыканий, основанный на оценке распределения магнитного поля в системе магнитопровод - контрольный магнитный шунт;

- предложена методика контроля повреждений стяжных призм, основанная на изменении механической напряженности в доступных частях призм от пластической деформации и разрушения призмы в недоступных и наиболее механически напряженных ее местах.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ:

- разработан пакет программ для расчета аксиального магнитного поля в торцевой части сердечника статора с учетом тангенциальной неравномерности;

- разработан датчик и устройство контроля состояния прессовки пакетов сердечника статора ТГ;

- разработан датчик и устройство контроля межлистовых замыканий в сердечнике статора ТГ;

- на базе стандартных измерительных средств разработаны техническое и программное обеспечение контроля и прогнозирования температур в маневренных режимах работы ТГ;

- разработан способ исполнения крайних пакетов ТГ с "внутрипазовым" скосом, обеспечивающий снижение потерь в крайнем пакете сердечника и увеличение механической прочности системы крайний пакет-нажимной палец-фланец.

ВНЕДРЕНИЕ. Комплект разработанных датчиков и аппаратуры контроля внедрен в электроцехе ЛПП "Ленэнергоремонт", г. Санкт-Петербург. Применение устройства и датчиков при обслуживании пяти ТГ мощностью 320 МВт позволило получить годовой экономический эффект в 1988 г. в размере 86.4 тыс. руб.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты работы были доложены на научно-технической конференции "Проблемы электромашиностроения", г Санкт-Петербург, октябрь 1997 г., Республиканском семинаре "Совершенствование судовых и автономных электромеханических систем", г. Севастополь, 1990 г., научных семинарах "Электромагнитные и тепловые процессы в высокоиспользованных электрических машинах" научного совета ИЭД АНУ, 1987-1992 гг..

ПУБЛИКАЦИИ. Результаты, полученные в работе, отражены в восьми публикациях, в том числе двух статьях, трех авторских свидетельствах, двух научно-технических отчетах о НИР, тезисах доклада на конференции.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ.

Диссертация состоит из введения, 5 глав текста с выводами по каждой главе, заключения, списка использованной литературы и 2 приложений. Изложена на 167 страницах, в том числе: основная часть 110 стр. машинописного текста, 26 рисунков на 14 страницах, 7 таблиц на 4 стр., список литературы из 110 наименований на 11 стр. и приложения на 24 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и основные задачи, изложены методы исследования и новые научные результаты, полученные в работе, приведены сведения о практической ценности, реализации результатов и апробации работы.

Первая глава посвящена построению математической модели электромагнитного поля в торцевой части, учитывающей тангенциальную неоднородность сердечника статора ТГ.

Магнитное поле в торцевой части ТГ имеет сложный трехмерный характер, определяемый сложной геометрией конструкции торцевой части и различными фазами токовых нагрузок статора и дотера при различных режимах работы. Для исследования температурных и механических перегрузок крайнего пакета необходимо рассчитывать прежде всего аксиальное магнитное поле на торце сердечника статора.

Для анализа аксиального магнитного поля в области крайних пакетов статора с учетом тангенциальной неравномерности рассмотрены такие его составляющие:

I. Аксиальные составляющие от лобовых частей статора и

ротора;

2. Составляющая "выпучивания" из зазора;
3. Составляющая "выпучивания" пазового рассеяния;
4. Составляющая "выпучивания" основного потока с учетом зубчатости статора;

5. Вторичные составляющие токов экрана, фланца и других конструктивных элементов в области крайнего пакета.

При расчете электромагнитного поля и потерь в торцевой зоне ТГ возникают значительные трудности из-за:

- трехмерности поля;
- сложности геометрии и неоднородности расчетной области;
- наличия распределенных в пространстве источников поля, изменяющихся во времени;
- нелинейности и анизотропности используемых активных и конструктивных материалов.

Основным принципом, положенным в основу данной методики, является принцип суперпозиции составляющих электромагнитного поля от различных источников, вычисляемых с помощью отдельных двумерных математических моделей, обладающих высокой адекватностью. Данный подход позволяет избежать указанных выше затруднений.

Общее расчетное поле в области крайних пакетов представляет собой сумму всех составляющих узлов с учетом конкретного режима работы турбогенератора. При этом суммарный вектор индукции электромагнитного поля вычисляем по формуле

$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{ст}} + \vec{B}_r + \vec{B}_n + \vec{B}_z,$$

где \vec{B} - индукция результирующей составляющей поля в торцевой части сердечника статора ТГ;

$\vec{B}_{\text{ст}}$, \vec{B}_r - индукции полей лобовых частей обмоток статора и ротора;

\vec{B}_n - индукция поля пазового рассеяния в концевую зону;

\vec{B}_z - индукция магнитного поля воздушного зазора, в т. ч. вытесненного в концевую зону.

Угол сдвига фазы векторов индукции поля, создаваемого обмотками ротора и статора, равен:

$$\Phi = \theta + \varphi + \pi/2 + \pi/2 (1 - \beta),$$

где β - отношение шага к величине полюсного деления;

θ - угол нагрузки;

φ - угол мощности.

В целом математическая модель магнитного поля на торце сердечника статора представляет собой ряд двумерных математических моделей, с помощью которых определяются поля рассеяния лобовых частей обмоток ТТ и поля "выпучивания" из воздушного зазора, магнитные поля рассеяния в пазу и "выпучивания" из паза статора, вторичные электромагнитные поля от экрана и нажимного фланца, а результирующее значение индукции определяется на основании описанной методики. В главе подробно рассмотрены необходимые математические модели и получены граничные условия.

Во второй главе рассмотрены методика численной реализации математической модели магнитного поля торцевой части ТТ.

На основе сравнительного анализа численных методов для реализации расчета по методике, изложенной в первой главе, выбран метод конечных элементов.

Для расчета магнитного поля в торцевой части сердечника статора ТТ принята математическая модель, не учитывающая вихревые токи. Рассмотрена следующая система уравнений:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J},$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0,$$

$$\vec{B} = \mu(\vec{H}) \cdot \vec{H},$$

где \vec{J} - вектор сторонних токов.

После введения векторного магнитного потенциала и разложения первого уравнения на составляющие получим систему уравнений:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu J_z + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} = -\mu J_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial z} + \frac{\partial A_y}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} = -\mu J_y + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \right)$$

Все три уравнения системы имеют практически идентичную форму, следовательно, расчет соответствующих составляющих

векторного магнитного потенциала можно проводить с помощью метода конечных элементов в двумерной постановке путем определения функции $A(x,y)$, минимизирующей функционал, составленный на основе энергетических соотношений магнитного поля.

Расчетную трехмерную область разбиваем на ряд двумерных областей вдоль каждой из осей координат. В качестве нулевого приближения принимаем $A_x=0$, $A_y=0$. Рассчитываем значения векторного магнитного потенциала $A_z(x,y,z)$, соответствующие решению первого уравнения для двумерных областей вдоль оси z . В соответствии с полученными результатами определяем значения правых частей второго и третьего уравнений и рассчитываем $A_x(x,y,z)$ и $A_y(x,y,z)$. Далее, на основании методики, изложенной в первой главе, находим значения индукций в расчетной трехмерной области.

На втором и последующих приближениях в соответствии с полученными $A_x(x,y,z)$ и $A_y(x,y,z)$ корректируем значение сторонних токов в первом уравнении и повторяем расчет до удовлетворения условию

$$\left| \frac{-i}{B} - \frac{-i+1}{B} \right| < \varepsilon$$

Нелинейность среды учитывается путем коррекции значений массива $\mu(x,y,z)$ в процессе итераций методом верхней релаксации.

В работе описаны расчетные области для всех трех плоскостей, построенные в соответствии с математическими моделями, представленными в первой главе.

Для расчета величин индукции на поверхности крайнего пакета сердечника статора разработан пакет программ, реализующий изложенную методику.

Пакет содержит программы триангуляции расчетных областей по заданной геометрии, формирования данных для основной программы, основную программу расчета магнитного поля методом конечных элементов, программы расчета и коррекции значений сторонних токов, расчета и коррекции значений магнитной проницаемости и графического представления результатов расчета. Пакет объединен программой-менеджером. Программы написаны на языках FORTRAN и QBasic.

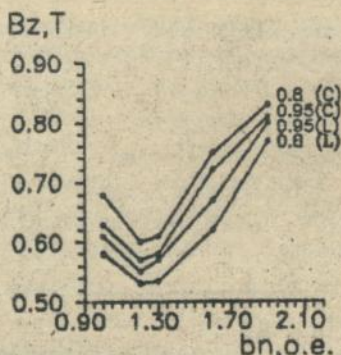
Третья глава содержит результаты исследования магнитного поля торцевой части сердечника статора ТГ в различных режимах нагрузки машины, в т.ч. в режимах с потреблением реактивной

мощности.

Исходные данные для расчетов, а именно величины и начальные фазы токов статора и ротора, были получены на основе расчета этих параметров с помощью стандартной инженерной методики поверочного расчета мощного ТГ, реализованного в виде составной части САПР "КОНЭЭМ" в лаборатории IOI Института электродинамики АНУ. В качестве прототипа был выбран ТГ типа ТГВ-200М.

В результате расчета были получены кривые распределения аксиальной индукции B_z на поверхности крайнего пакета сердечника статора ТГ. С целью разработки нового способа исполнения крайних пакетов сердечника статора рассчитывалось магнитное поле на торце сердечника статора ТГ при изменении геометрии пазов крайних пакетов.

Как видно из результатов расчета (рис.1), увеличение ширины паза b_n в 1.2-1.3 раза приводит к снижению индукции B_z на поверхности зубца у расточки на 15-20%. Это соответствует уменьшению потерь в зубцовой зоне крайнего пакета ТГ в 1.8 раза.



При дальнейшем увеличении расширения паза индукция возрастает, причем, когда ширина паза достигает 1.5 о.е., величина индукции равна ее значению при нормальной ширине паза. При этом потери в зубцах крайнего пакета в 2.7

рис.1

раза ниже, чем при нормальной ширине паза, что объясняется уменьшением объема зубцов. Дальнейшее расширение паза ограничивается только механической прочностью зубцов. В режиме с $\cos\phi = 0.95$ (емк.) индукция на сбегающем краю зубца при расширении в 1.3 раза практически равна индукции в этой же области в номинальном режиме, что свидетельствует об эффективности предлагаемого способа исполнения крайних пакетов сердечника статора ТГ.

По результатам исследования предложен способ исполнения крайних пакетов сердечника статора с "внутрипазовым" скосом (рис.2).

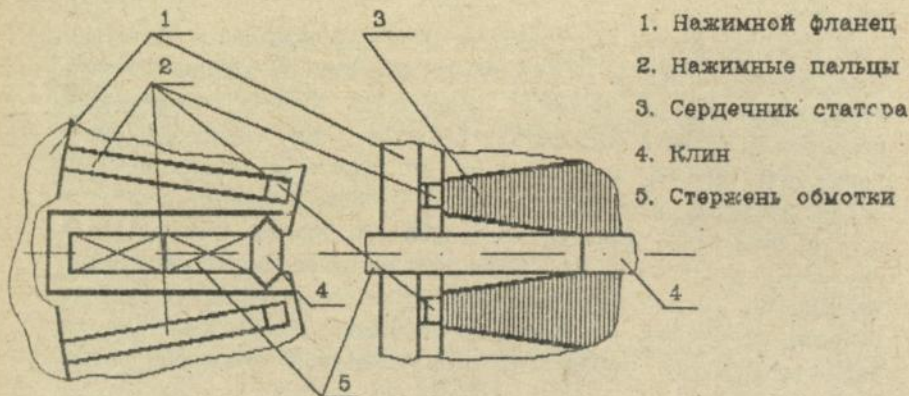


Рис. 2

В четвертой главе представлены средства контроля и диагностики статора мощного ТГ в процессе эксплуатации.

Разработано техническое и программное обеспечение системы контроля и прогнозирования теплового состояния элементов конструкции ТГ в динамических режимах нагрузки. Система обеспечивает контроль максимальных температур в объекте, производит сравнение максимальных температур с заданными уставками и в случае ее превышения осуществляет расчет допустимого времени работы $t_{\text{доп}}$ с учетом допустимой температуры $\theta_{\text{доп}}$.

$$\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{п}} + (\theta_{\text{н}} - \theta_{\text{п}}) * [1 - f(t_{\text{доп}})],$$

где $\theta_{\text{н}}$, $\theta_{\text{п}}$ - локальный установившийся нагрев нового и предшествующего режимов.

В основе прогнозирования заложены методы экстраполяции кривой нагрева на весь временной отрезок теплового переходного процесса по данным измерения температуры в начальных точках нагрева t_1, t_2, t_3, \dots . Тем самым на начальной стадии процесса нагрева и при $t_{\text{доп}} \gg t_1, t_2, t_3, \dots$ определяется установившаяся температура в точках контроля, а при необходимости, когда установившаяся температура превышает допустимую, и допустимое время работы в реальном масштабе времени.

В результате проведенных работ создан опытный образец системы, выполненный на базе стандартных контрольно-измерительных средств, средств предварительной обработки и

передачи сигналов, вычислительных средств. Разработаны математический аппарат и программные продукты, реализующие специальную аналитическую и статистическую обработку данных измерения. Разработаны методика и программы экстраполяции температурно-временной зависимости. В работе подробно описаны структура и работа составных частей системы.

Система успешно прошла испытания в лабораторных условиях и на Дарницкой ТЭЦ г.Киева.

В лаборатории динамические тепловые процессы моделировались на специальной физической модели. Установившаяся температура находилась в диапазоне 40...150°C, а постоянные времени нагрева - 1...60 мин. Испытания системы в различных условиях показали, что прогноз установившейся температуры осуществляется с погрешностью 10 - 15%.

В практике эксплуатации ТГ наблюдаются ослабление затяжки призм, а нередко смятие резьбы призм в месте посадки гаек и даже отламывание части призм с гайкой. Как известно усилия прессовки сердечника составляют около 800 т (ТГВ-200). При этом напряжение в призмах составит $1,31 \times 10^8$ Н/м² при пределе текучести $2,16 \times 10^8 - 2,45 \times 10^8$ Н/м². Неоднородность затяга призм, разные температурные коэффициенты расширения сердечника и призм, температурные градиенты в концевой области призм, вызванные паразитными вихревыми токами, обуславливают дополнительные усилия, в т.ч. и такие, которые приводят к напряжениям, превышающим предел текучести.

В этих условиях возникает необходимость оперативного контроля и диагностики состояния стяжных призм для определения возможности появления пластических деформаций в призмах и их разрушения.

С этой целью разработан способ, заключающийся в том, что на поверхности призм устанавливаются чувствительные к изменению линейных размеров датчики перемещений, с помощью которых измеряют величину взаимных перемещений между фиксированными точками на призмах, где установлены датчики, и точками на сердечнике или на других элементах конструкции статора, передающих усилие прессовки. По градуировочной зависимости механических напряжений в местах наименьшего сечения призм от взаимных перемещений между указанными точками определится появление пластических деформаций и повреждение стяжных призм.

Для каждого типа турбогенераторов ввиду конструктивных различий требуется своя градуировочная зависимость.

Предлагаемый способ был проверен в лабораторных условиях и на ТГ типа ТВ-60-2 Дарницкой ТЭЦ. В качестве датчиков применены тензорезисторы. В лабораторных условиях на физической модели была получена градуировочная зависимость показаний датчиков от механического напряжения в месте наименьшего сечения призмы. Согласно показаниям датчиков, установленных на ТВ-60-2, повреждений стержней призм не выявлено.

В пятой главе представлены результаты разработки и исследования средств контроля и диагностики повреждений сердечника статора при регламентированных работах и ремонтах ТГ.

Методика и способ контроля состояния прессовки пакетов сердечника статора ТГ разрабатывались с целью своевременного определения с помощью средств контроля и диагностики состояния прессовки пакетов сердечника статора турбогенератора и проведения работы по устранению либо по приостановлению процесса распрессовки. Разработано устройство контроля состояния прессовки пакетов сердечника статора. Устройство реализует неразрушающий способ контроля трансформаторным датчиком специальной конструкции. Предложенная конструкция датчика была проанализирована с помощью математического моделирования структуры датчик-контролируемый пакет методом цепей. На основе анализа получена зависимость величины эквивалентного воздушного зазора l_3 в пакете от показаний датчика:

$$l_3 = \frac{2,22 W_1 W_2 f S}{E_{21}} (I_{11} - I_{12} + I_{13} - I_{14}) k,$$

где W_1, W_2 - число витков первичных и вторичных обмоток;

S - площадь сечения магнитопровода датчика;

$I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{14}$ - токи первичных обмоток датчика;

E_{21} - ЭДС вторичных обмоток;

k - коэффициент, учитывающий конструктивные особенности датчика.

Благодаря специальному алгоритму контроля показания не зависят от точности установки датчика на шероховатостях поверхности ротора статора.

Разработана и создана физическая модель пакета сердечника ТГ, на которой исследовался процесс распрессовки предложенным

способом. Получена тарировочная зависимость показаний датчика от усилий прессовки в пакете. Проведенные исследования показали эффективность устройства при контроле усилий прессовки от 100 до 4000 кН/м², а также совпадение показаний, полученных различными способами. Экспериментальный образец устройства был опробован на ТГ Кольской АЭС, Киришской ГРЭС и Дарницкой ТЭЦ.

Разработан способ и созданы технические средства высокоэффективного контроля и диагностики межлистовых замыканий в пакетах сердечника статора. Этот способ предусматривает установку обмотки возбуждения, охватывающую сердечник статора, и основан на явлении перераспределения магнитного потока обмотки возбуждения в сердечнике статора при наличии межлистовых замыканий в область установленного на поверхности ротора магнитного шунта с контрольной обмоткой.

С целью анализа процесса межлистовых замыканий была создана физическая модель. Исследования показали, что наличие межлистовых замыканий практически не влияет на амплитуду и фазу магнитного потока в сердечнике. Основным диагностическим параметром для определения данного вида повреждения может являться магнитный поток, перераспределяющийся в области повреждения в роторку, в частности при применении магнитного шунта. Основной поток в ярме сердечника создавался вспомогательной обмоткой. Индукция в ярме составила $B = 0,1$ Тл. При этом замыкание уже двух листов приводит к увеличению ЭДС в контрольной обмотке шунта на 2%. Замыкание же 12 листов дает увеличение ЭДС более чем на 55 %.

С целью увеличения точности, а также для уменьшения числа измерений на основании проведенных исследований были предложены и изготовлены датчик и устройство контроля межлистовых замыканий в пакете статора. Датчик представляет собой восемь идентичных магнитных шунтов, по четыре на паз, охватывающий при установке два паза и весь пакет в аксиальном направлении. Размеры датчика по толщине 0,01м позволяют использовать его при невынутом роторе ТГ.

Устройство представляет собой микропроцессорный блок контроля и обработки, реализующий проверку условий по данным измерений U_1 для четырех индикаторных обмоток, установленных над одним пазом, и U_2 для обмоток, установленных над соседним пазом,

$$U'_{imax} > U'_{jmin} * K_1,$$

$$U''_{imax} > U''_{jmin} * K_1,$$

$$| \sum U'_1 - \sum U''_1 | > \min | \sum U'_1 | * K_2.$$

Если условия не выполняются, то область не имеет замыканий листов.

K_1 и K_2 - коэффициенты, которые определяются параметрами вспомогательной обмотки возбуждения и неоднородностью распределения полей рассеяния. При исследовании на модели достоверное определение наличия замыкания десяти листов с помощью описанных условий достигалось при $K_1 = 1.3$ и $K_2 = 2$.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена научная задача исследования и разработки эффективных способов и технических средств исполнения и контроля эксплуатационного состояния сердечника статора, обеспечивающих повышенную нагрузочную способность турбогенератора.

Разработанные способы и технические средства при использовании их в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации, как непосредственно во время работы, так и при ремонтном обслуживании, позволяют повысить надежность работы ТГ и эффективность его ремонта.

Научные и практические результаты исследования можно сформулировать в виде следующих выводов:

1. Разработанная математическая модель и программы расчета трехмерного магнитного поля торцевой части мощного ТГ позволяют адекватно учесть в едином комплексе зубцово-пазовую конструкцию крайних пакетов, дискретное распределение стержней обмотки статора и магнитное состояние зубцов сердечника статора.

2. Определено, что предложенный новый способ исполнения крайних пакетов сердечника статора позволяет снизить величину аксиальной индукции магнитного поля B_z на торце сердечника статора на 15-20%, что приведет к снижению потерь в зубцах крайних пакетов в 1.8 раза, и позволит эффективно эксплуатировать ТГ в режимах с потреблением реактивной мощности. Способ исполнения обеспечивает достаточную механическую прочность крайних пакетов сердечника статора ТГ.

3. Предложен метод контроля прессывки пакетов сердечника

статора ТГ, который дает возможность проводить эффективный неразрушающий контроль состояния прессовки без выемки ротора с учетом неровности поверхности расточки. Проведенные натурные испытания на ТГ Кольской АЭС, Киришской ГРЭС и Дарницкой ТЭЦ подтвердили эффективность способа.

4. Разработанный метод контроля межлистовых замыканий обеспечивает эффективный контроль наличия замыкания пяти и более листов внутри сердечника статора, в т.ч. на дне паза с уложенной обмоткой статора при возбуждении магнитного поля в сердечнике слаботочной обмоткой. При этом величина контролируемого параметра при наличии пяти замкнутых листов увеличивается на 25%.

5. Разработанная методика контроля повреждений стяжных призм позволяет обнаружить излом либо пластическую деформацию призмы в области наибольших механических нагрузок по данным контроля взаимных перемещений элементов конструкции и механических напряжений в доступных частях призм.

6. Применение технических средств и программного обеспечения контроля и прогнозирования температур даст возможность определять и прогнозировать во времени с погрешностью 15-20% локальные перегревы в широком диапазоне постоянных времени тепловых процессов и позволит эффективно контролировать состояние элементов конструкции турбогенератора в маневренных режимах работы.

Печатные работы :

1. Данилевич Я.Б., Елин И.И., Кушнир С.С. и др. Система контроля и прогнозирования теплового состояния ТГ в динамических режимах работы // Электрические станции. - 1992. - №7. - С.69-71.

2. Кушнир С.С. Разработка и исследование средств обеспечения высокой нагрузочной способности статора мощных ТГ. В кн. Проблемы электромашиностроения: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Л.: ВНИИЭлектромаш, 1991. - 184 с.

3. АС NI377570 СССР. Способ диагностики и контроля повреждения стяжных призм электрических машин. Г.Г.Счастливый, А.И.Титко, А.А.Бабяк, С.С.Кушнир - Оpubл. Бюлл. №8, 1988.

4. АС NI582283 СССР. Способ диагностики прессовки шихтованного сердечника магнитопровода. А.И.Титко, С.С.Кушнир, В.Е.Павленко, Г.В.Ростик - Оpubл. Бюлл. №28, 1990.

5. АС NI690084 СССР. Статор электрической машины

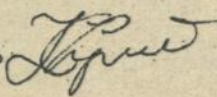
переменного тока. А.И.Титко, С.С.Кушнир -Опубл.Бюлл. N 4I,1991.

6. Титко А.И., Кушнир С.С. Увеличение нагрузочных возможностей ТТ путем применения эффективных экранов. /Электромагнитные и тепловые процессы в электромеханических преобразователях и технологических установках.-Киев:Изд.Ин-та электродинамики АН УССР,1988.- 172 с.

7.Провести комплексные исследования нагрузочной способности и эксплуатационной надежности и разработать научные основы создания мощных электрических машин предельного использования. Заключительный отчет по НИР, N гос.рег. ОI.860087254.

8.Создание системы контроля нагрузочных возможностей генераторов по реактивной мощности. Заключительный отчет по НИР, N гос.рег. ОI.827049698.

В работах, написанных в соавторстве, лично соискателю принадлежат: разработка программ экстраполяции и управления программными и аппаратными средствами (I,8), расчет и анализ величин аксиального поля на торце сердечника ТТ в различных режимах нагрузки(6,7). В работах 3-5 авторы имеют равные авторские права.

Соискатель  Кушнир С.С.

Подп. к печати 26.03, 1993 г. Формат 60x84/16 Офс.печ.

Бум. офс. N2 Усл.-печ.лист 1,0, Уч.-изд.лист 1,0.

Тираж 120. Заказ 369, Бесплатно

465266

AB 27.187

AB 27.187