

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

УДК 621.313.322

К.А. Кучинский

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РОТОРА В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТГВ-300 ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ ОХЛАЖДЕНИЯ

Чисельним методом досліджено температурні поля в елементах зубцевого поділу ротора турбогенератора ТГВ-300 потужністю 300 МВт із безпосереднім водневим охолодженням у номінальному режимі при різних можливих варіантах закупорювання вентиляційних каналів і з урахуванням зміни умов охолодження обмотки ротора. Визначено сполучення й кількість «дефектних» каналів охолодження, за яких максимальна температура ізоляції обмотки близька або перевищує гранично допустиму для відповідного класу нагрівостійкості її матеріалу.

Турбогенератор типа ТГВ-300 предназначен для выработки электроэнергии при непосредственном соединении с паровой турбиной мощностью 300 МВт и скоростью вращения 3000 об/мин.

Ротор ТГВ-300 охлаждается водородом и выполнен таким образом, что лобовые и пазовая части охлаждаются раздельными потоками газа. Обмотка состоит из 18 катушек, уложенных в пазы. В катушке семь витков, каждый из которых состоит из двух проводников корытообразного сечения, образующих проводник с внутренним каналом прямоугольного сечения. Выход газа, охлаждающего пазовую часть обмотки, осуществляется в средней части ротора через радиальные отверстия в проводниках и пазовых клиньях.

Пазовая изоляция состоит из стеклоткани, пропитанной эпоксидно-фенольным лаком с прослойками из стеклослюдинитовой бумаги. Под нижним витком уложены дополнительные изолирующие прокладки общей толщиной 0,7 мм из стеклотекстолита марки СТЭФ-Р, а между клиньями и верхними витками – прокладки общей толщиной не менее 10 мм. Обмотка пазовой части крепится дюралюминиевыми клиньями марки Д16Т [6].

Вследствие подвижности обмотки ротора турбогенератора с непосредственным водородным охлаждением при пусках и остановках в практике эксплуатации имело место смещение изоляционных прокладок между витками изоляции, что приводило к местным перекрытиям отверстий для прохождения водорода. Подобная закупорка вентиляционных каналов приводит к повышенному местному нагреву обмотки с последующим повреждением изоляции. В местах отсутствия вентиляции температура меди может достигать значительных величин [7], что требует дополнительных уточненных исследований тепловых нагрузок при наличии таких возможных аномалий неравномерного нагрева проводников обмотки.

Среди основных методов расчета установившихся и неустановившихся тепловых процессов в электрических машинах различают метод эквивалентных греющих потерь, аналитический метод, или метод температурного поля, метод эквивалентных тепловых схем замещения.

Необходимость определения эквивалентных параметров (тепловых сопротивлений участков, коэффициентов греющих потерь) предполагает их усреднение. Это является основным недостатком указанных методов, поскольку срок службы изоляции и ряд других важных факторов в различных эксплуатационных режимах работы машины зависят от локальных пере-

гревов ее наиболее нагруженных зон, связанных с распределенными параметрами.

Учитывая изложенное, создание эффективной уточненной методики для определения температурного поля машины в различных режимах работы является актуальной задачей. Методика теплового расчета должна учитывать геометрические особенности конструкции, тепловые источники, теплофизические свойства материалов, влияние различных факторов на величины перегревов элементов машины для ряда конструктивных решений. Этим требованиям может удовлетворить только методика, основанная на использовании вычислительной техники и численных методов расчета.

Сложная геометрия машины требует подробной ее детализации расчетными узлами при высоких нагрузках. Использование треугольной сетки либо элементов высокого порядка в методе конечных элементов (МКЭ) позволяет это наилучшим образом. МКЭ характеризуется значительной гибкостью в построении дискретной модели расчетной области, что дает возможность уменьшить общее количество расчетных точек за счет областей слабого изменения поля. Матрица коэффициентов разрешающей системы уравнений имеет ленточную, разреженную, симметричную структуру. Преимуществом МКЭ является также простота задания граничных условий.

Для исследования тепловых процессов в активной зоне бочки ротора мощного турбогенератора при частичной закупорке вентиляционных каналов были выполнены численные расчеты при номинальной электрической нагрузке. Объектом исследований являлся турбогенератор мощностью 300 МВт типа ТГВ-300 с непосредственным водородным охлаждением. Обмотка ротора охлаждалась водородом, который заходил в вентиляционные каналы на торцах бочки ротора и выходил в зазор в средней части машины. Рассчитывалось плоское температурное поле на зубцовом делении в наиболее нагретой зоне бочки ротора – на выходе горячего газа из обмотки.

В численном расчете принимались следующие основные допущения:

1. Температурное поле полагалось плоскопараллельным;
2. Считалось предварительно выполненными электромагнитный и вентиляционный расчеты;
3. Однородные области изотропны, теплофизические характеристики материалов не зависели от температуры;
4. Тепловое сопряжение на границах раздела сред – идеальное.

Далее описывается уточненная методика расчета температурных полей в активной зоне ротора турбогенератора, основанная на численном решении уравнений стационарной теплопроводности с применением вычислительной техники и МКЭ.

В основу расчета приняты теоретические положения [4, 5, 8], которые кратко сводятся к следующему.

В качестве математической модели температурного поля для установившегося теплового режима используется основное уравнение теплопроводности:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q = 0, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); T – температура, °С; q – потери в единице объема, Вт/м³.

Общее уравнение теплопроводности для двумерной изотропной области имеет вид

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q = 0. \quad (2)$$

Обеспечение единственности его решения достигается при задании конкретных краевых условий. Пространственные краевые условия в предлагаемой методике могут быть следующими:

1. Заданы значения температур на некоторой границе тела ротора или ее части

$$T_{\text{гр.}} = T(x_{\text{гр.}}, y_{\text{гр.}}). \quad (3)$$

2. При наличии теплообмена задан тепловой поток

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = Q_{\text{гр.}}(x_{\text{гр.}}, y_{\text{гр.}}) \quad (4)$$

или закон теплообмена поверхности с окружающей средой

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha [T_{\text{пов.}} - T_c], \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); $T_{\text{пов.}}$ – неизвестная температура на границе, °С; T_c – температура окружающей среды, °С; n – вектор нормали к поверхности раздела сред.

По МКЭ уравнение (1) решается, исходя из энергетической концепции. При этом в двумерной постановке для изотропной среды энергетический функционал имеет вид

$$\chi = \iint \left\{ \frac{1}{2} \lambda \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - q \cdot T \right\} dx dy. \quad (6)$$

Решение уравнения (2) по МКЭ эквивалентно нахождению функции T , удовлетворяющей условиям на границе и минимизирующей функционал (6).

МКЭ предполагает разбижку исследуемой области на отдельные элементы. Искомая функция отыскивается в узлах сетки, накладываемой на расчетную область. При этом узлы не должны «рассекать» стороны соседних элементов, чем обеспечивается непрерывность искомой функции на общих границах смежных элементов. Линии сетки совпадают с границами раздела сред.

В большинстве практических случаев для решения двумерных задач ограничиваются применением треугольных элементов первого порядка. Каждый из элементов характеризуется координатами вершин (узлов) i, j, m в декартовой системе координат, свойствами материала – коэффициентами теплопроводности, теплоотдачи – и, кроме того, потерями, выделяемыми в данном элементе.

В результате минимизации (6) получается матричное уравнение для определения температуры в пространстве:

$$\left\{ \frac{\partial \chi}{\partial T_n} \right\} = \sum_e \left\{ \frac{\partial \chi}{\partial T_n} \right\}_e = [H]\{T\} - \{R\} = 0, \quad (7)$$

где $[H]$ – глобальная матрица теплопроводности; $\{R\}$ – вектор тепловых источников.

Эти матрицы могут быть получены в результате суммирования матриц всех треугольных элементов, которыми покрыта исследуемая область.

Система (7) формируется для всей задачи с учетом граничных условий. В случае постоянных конвекционных потерь вдоль границы функционал (6) преобразуется к виду

$$\chi = \iint \left\{ \frac{1}{2} \lambda \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - qT \right\} dx dy + \int_d \alpha \left(\frac{T^2}{2} - T_a T \right) dl, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; d – длина границы, на которой заданы условия охлаждения; dl – элемент длины границы; T_a – температура охлаждающего агента на границе.

Изложенные теоретические положения реализованы в виде пакета программ TERM для ПК на языке ФОРТРАН. Метод решения – блочное исключение по Гауссу.

В данной работе решалась задача уточненного расчета температурных полей в роторе турбогенератора мощностью 300 МВт типа ТГВ-300 в номинальном синхронном режиме при различных вариантах закупорки охлаждающих каналов в обмотке ротора, поскольку "... такой дефект на работающем турбогенераторе не всегда может быть выявлен своевременно, хотя в местах отсутствия вентиляции ... на меди могут возникать цвета побежалости" [7].

Расчетной областью является поперечное сечение зубцового деления в активной зоне ротора генератора (рис. 1), решение отыскивается в декартовой системе координат.

Область разбивалась на 402 элемента, температуры определялись в 232 узлах треугольной сетки. При этом на рис. 1 выделены по позициям элементы: 1 – зубца (коронка, нижние слои модели – собственно зубец и ярмо); 2 – тонкого слоя между обмоткой, зубцом (стенкой паза), клином и дном паза, соответствующего пазовой изоляции; 3 – меди элементарных проводников обмотки; 4 – вентиляционных каналов; 5 – клина.

Коэффициенты теплопроводности λ [Вт/(м·°С)] принимались равными 55; 0,34; 0,19; 385; 160 соответственно для стали, изоляции (стеклотекстолит), водорода, меди, дюралюминиевого клина [3].

Величина коэффициента теплоотдачи α с поверхности бочки ротора в водород воздушного зазора принята 1410 Вт/(м²·°С), температура холодного газа 35 °С, превышение температуры газа в зазоре 43 °С, соответственно температура газа в зазоре 78 °С. При скорости газа в вентиляционных каналах 48 м/с коэффициент теплоотдачи в них равен 880 Вт/(м²·°С), а температура газа в канале на выходе из обмотки в номинальном режиме 85 °С [2]. Удельные потери в меди обмотки ротора в номинальном режиме составляют 1,694 Вт/см³.

Моделирование термодфектов осуществлялось последовательной закупоркой вентиляционных каналов (по одному) витков катушки, начиная с верхнего, ближайшего к пазовому клину, и далее увеличивая число их, рядом находящихся, к элементарным проводникам на дне паза. При этом для различных вариантов закупорки каналов в обмотке ротора увеличение температуры газа в незакупоренных каналах предполагалось, в первом приближении, пропорциональным числу закупоренных каналов.

На рис. 2, 3 представлены результаты исследований температурного поля соответственно по оси зубца (т.е. радиусу ротора, совпадающему в области на уровне паза с поверхностью внешней пазовой изоляции), и по оси паза (т.е. радиусу ротора, совпадающему в области паза с медью (внутренней поверхностью пазовой изоляции элементарных проводников)). Обозначения кривых от 1 до 8 соответствуют вариантам расчета без закупорки (1), закупорке канала верхнего витка (2), двух верхних каналов (3) и т.д., до варианта 8, когда все семь каналов катушки полностью закупорены.

Из полученных результатов следует, что при увеличении числа закупоренных каналов существенно возрастают нагревы меди обмотки и железа ярма ротора, а также величины перепада температур по толщине изоляции в зубцово-пазовой зоне. При этом поверхность ротора, интенсивно охлаждаемая газом в зазоре, практически нечувствительна к изменениям температур в его средней и нижней частях.

Расчетные максимальные температуры изоляции обмотки ротора ТГВ-300 в установившихся режимах при различном числе закупоренных каналов представлены в таблице.

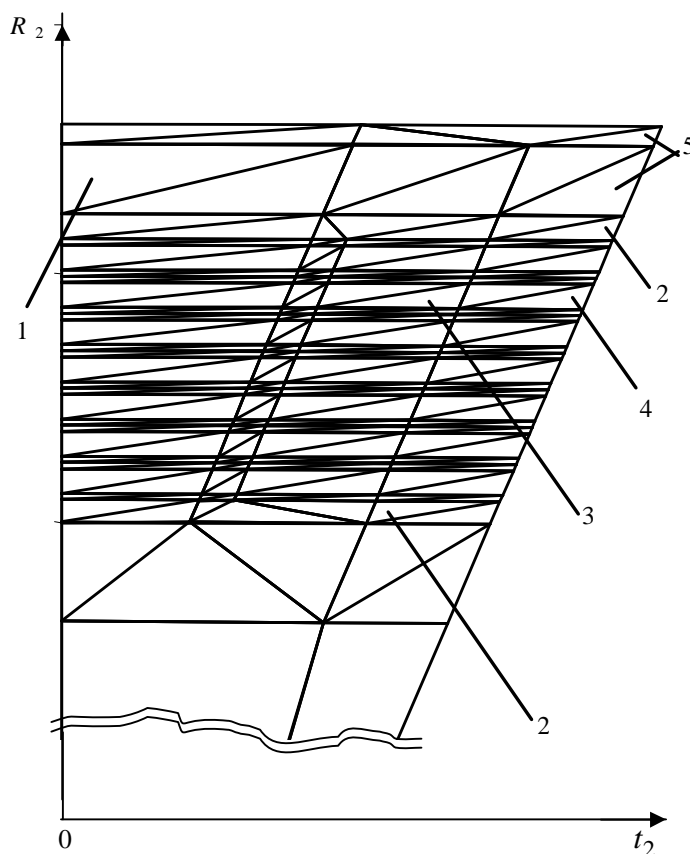


Рис. 1

Количество закупоренных каналов	0	1	2	3	4	5	6	7
Максимальная температура изоляции обмотки при $P = P_{\text{ном}}$, $T_{\text{хол. газа}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	96,8	106,5	117,4	129,2	142,9	159,3	185,7	320,1
Средняя температура изоляции обмотки при $P = P_{\text{ном}}$, $T_{\text{хол. газа}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	70,9	75,5	83,9	91,2	98,9	107,5	121,4	197,5

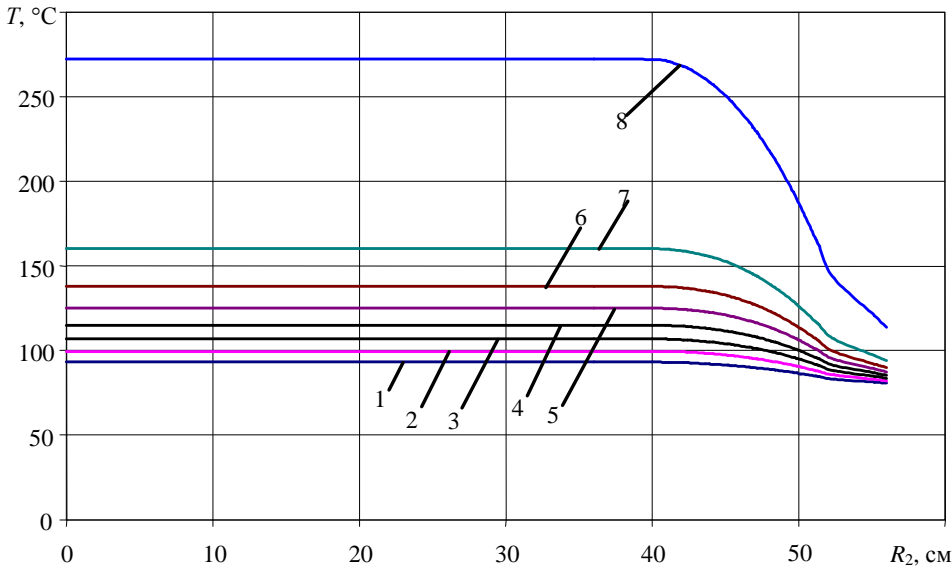


Рис. 2

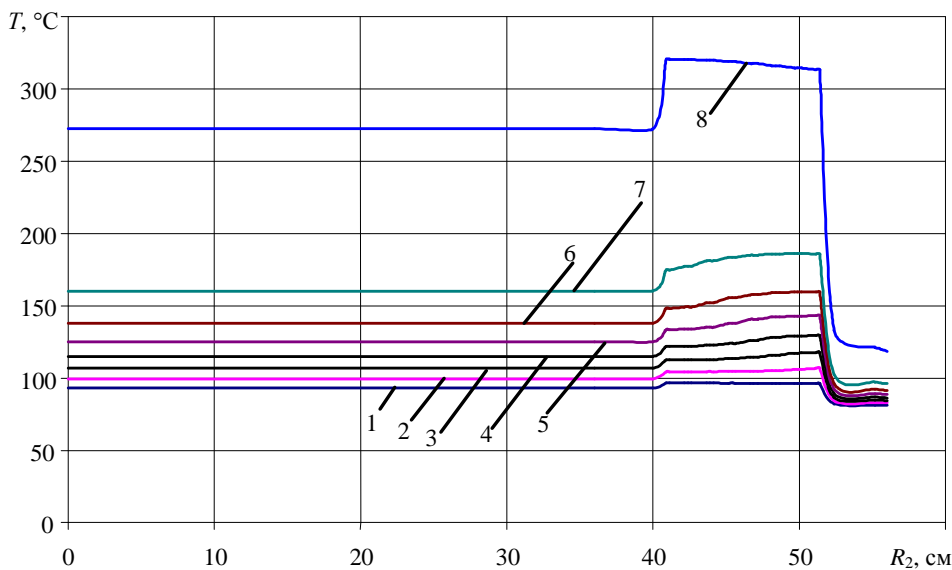


Рис. 3

Таким образом, уже при закупорке трех рядом находящихся вентиляционных каналов проводников локальная максимальная температура изоляции обмотки ротора при работе в номинальном режиме близка к предельно допустимой (130°C) для соответствующего класса нагревостойкости материала изоляции В. Если же делать вывод о возможности работы генератора на основании данных по средним (между железом зубца и медью в пазовой части) температурам изоляции, то недопустимым является режим только с полной закупоркой всех семи каналов витков катушки в пазу. Поэтому при обнаружении во время ремонта закупорки

даже трех или более вентиляционных каналов в обмотке, дальнейшая эксплуатация такого турбогенератора становится опасной с точки зрения теплового старения изоляции обмотки ротора.

Вследствие увеличения коэффициента неравномерности нагрева на перегреваемых участках обмотки в витках возникают внутренние напряжения сжатия. Согласно [1]

$$\sigma_{\text{сж}} = [\alpha_{\text{м}} t_{\text{макс}} - \alpha_{\text{с}} t_3 - t_0 (\alpha_{\text{м}} - \alpha_{\text{с}})] E_{\text{м}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{\text{м}}$ и $\alpha_{\text{с}}$ — коэффициенты линейного расширения меди и стали; t_3 — средняя температура зубцового слоя; $t_{\text{макс}}$ — максимальная температура меди; t_0 — температура ротора перед пуском 20°C ; $E_{\text{м}}$ — модуль упругости меди.

Тогда, например, при закупорке пяти каналов $\sigma_{сж} = [0,000017 \cdot 159,3 - 0,000012 \cdot 115 - 20 \cdot (0,000017 - 0,000012)] \cdot 1,1 \cdot 10^6 \cong 1350 \text{ кгс/см}^2$, что превосходит предел текучести меди ($1100 \dots 1200 \text{ кгс/см}^2$). Это приводит к остаточным температурным деформациям витков и механическому разрушению корпусной и витковой изоляции [1]. Кроме того, неравномерность охлаждения и распределения теплового потока может вызывать температурные напряжения в самом теле ротора. Поверхность большого зуба является наиболее холодной зоной ротора. Основная же центральная часть ротора охлаждается хуже. В результате центральная часть ротора расширяется и возникают напряжения разрыва в его холодных частях (на поверхностях зубцов и особенно большого зуба). К этому добавляются еще напряжения разрыва, которые появляются в роторе при нагреве обмотки, стремящейся удлиниться. Указанные явления снижают эксплуатационную надежность машины.

Выводы. 1. При закупорке вентиляционных каналов обмотки ротора с непосредственным охлаждением ее локальные максимальные температуры могут превышать предельно допустимую величину для соответствующего класса нагревостойкости материала изоляции.

2. Средние температуры изоляции не являются показательными с точки зрения допустимости режима при наличии соответствующих дефектов вентиляции.

3. Явление закупорки вентиляционных каналов проводников обмотки, наряду с уменьшением остаточного ресурса по критерию теплового старения изоляции, приводит к появлению в витках внутренних напряжений сжатия, остаточным температурным деформациям и механическому разрушению корпусной и витковой изоляции, температурным напряжениям в самом теле ротора.

4. Для автоматического получения более точной картины температурного поля ротора с учетом теплопередачи к его смежным областям необходимы численные исследования на полюсном делении геометрически несимметричной области (наличие большого зуба) при физической неравномерности распределения нагрева в локальных точках (дефектах охлаждения). Полученные результаты могут служить основой для последующих уточненных термомеханических исследований.

Численным методом исследованы температурные поля в элементах зубцового деления ротора турбогенератора ТГВ-300 мощностью 300 МВт с непосредственным водородным охлаждением в номинальном режиме при различных возможных вариантах закупорки вентиляционных каналов и с учетом изменения условий охлаждения обмотки ротора. Определены сочетания и количество «дефектных» каналов охлаждения, при которых максимальная температура изоляции обмотки близка или превышает предельно допустимую для соответствующего класса нагревостойкости ее материала.

The numerical method investigates temperature fields in elements toothed divisions of a rotor of turbogenerator ТГВ-300 by capacity 300 MW with direct hydrogen cooling in a nominal mode at various possible variants of corking of ventilating channels and in view of change of conditions of cooling of a winding of a rotor. Combinations and quantity of "defective" channels of cooling at which the maximal temperature of isolation of a winding is close are determined or exceeds maximum permissible for a corresponding class of thermal stability of its material.

1. Азбукин Ю.И. Анализ теплового состояния ротора турбогенератора ТВ-2-150-2 // Электрические станции. – 1971. – № 10. – С. 36–39.
2. Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.
3. Брынский Е.А. Вихревые токи, нагревы и обеспечение термостойкости массивных роторов крупных электрических машин переменного тока: Дисс. ... докт. техн. наук. – Л., 1987. – 419 с. Машинопись.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. Эксплуатация и ремонт турбогенератора ТГВ-300 / Под ред. Д.Я. Станиславского. – К.: Техніка, 1973. – 196 с.
7. Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / Под общ. ред. Л.С. Линдорфа, Л.Г. Мамиконянца. – М.: Энергия, 1972. – 352 с.
8. Flatabo N. Transient heat conduction problems in power cables solved by the finite element method // IEEE Trans. – 1973. – V.PAS-92. – № 1. – P. 56–63.