

\* \* \*

## Исследование старения изоляции обмотки статора турбогенератора

ЛИ ВЭЙЛИ, СЮЕ И., У ЧЖЕЭНЬСИН

С использованием метода конечных элементов выполнены расчет и анализ трехмерного температурного поля статора для установившегося продолжительного режима работы турбогенератора с воздушным охлаждением мощностью 200 МВт. Показано, что при старении электрической изоляции стержней обмотки статора уменьшается ее теплопроводность, однако это мало влияет на температурное поле в пазу и сердечнике статора. Старение изоляции стержней обмотки статора практически не зависит от ее температуры. Установлено влияние коэффициента теплопроводности подвергшейся старению пазовой изоляции на температурное поле статора. Определены потери на вихревые токи в статорной обмотке. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** турбогенератор, охлаждение, старение электрической изоляции, теплопроводность, потери

Нагрев турбогенераторов с воздушным охлаждением является одним из факторов, определяющих возможность увеличения их единичной мощности и безопасность эксплуатации. в установившемся

*The 3D temperature field of the stator is calculated and analyzed for a continuous steady-state operating mode of a 200-MW air-cooled turbine generator using the finite-element method. It is shown that ageing of the electrical insulation of stator winding bars entails a drop of its heat conductivity, but this phenomenon has little effect on the temperature field in the stator slot and core. Ageing of the insulation of stator winding bars is almost independent on its temperature. The effect the heat conductivity of slot insulation subjected to ageing has on the stator temperature field is determined. Eddy current losses in the stator winding are determined. The results of calculations are compared with experimental data.*

**Key words:** turbine generator, cooling, ageing of electrical insulation, heat conductivity, losses

продолжительном режиме работы нагрев обмотки турбогенератора ускоряет процесс старения изоляции, ухудшает ее свойства и сокращает срок службы. Превышение допустимой температуры нагрева

может привести к межвитковому короткому замыканию и созданию аварийной ситуации.

Таким образом, точный расчет температурного поля статора машины, исследование влияния температуры на изоляцию его обмотки необходимы не только для правильного выбора изоляционных материалов и принятия рациональных конструкторских решений, но и для создания надежной системы контроля работы турбогенератора, включая аномальные режимы.

В статье на основе математической модели синусоидального магнитного поля и вихревых токов методом конечных элементов рассчитаны потери на вихревые токи в обмотке статора и исследованы закономерности изменения ее температуры. Знание закономерностей старения изоляции обмотки статора позволяет диагностировать и прогнозировать возможные повреждения турбогенератора.

**Численный расчет коэффициента увеличения сопротивления обмотки статора.** Моделирование методом конечных элементов. В качестве объекта исследований выбран турбогенератор мощностью 200 МВт с воздушным охлаждением. Расчет потерь на вихревые токи выполнен методом конечных элементов. Задача решена в двухмерной постановке при следующих допущениях:

верхние и нижние слои обмотки в пазах статора совпадают по фазе;

обмотка статора считается бесконечно длинным проводником, уложенным вдоль оси генератора, т.е. вектор плотности тока  $\vec{J}$  и векторный магнитный потенциал  $A$  направлены вдоль оси  $Z$ ;

напряженность магнитного поля  $H$  предполагается зависимой только от координаты  $Y$ ;

сердечник якоря имеет бесконечную магнитную проницаемость  $\mu_{Fe} = \infty$ .

Пазовый клин, пазовая и витковая изоляция статора выполнены из немагнитного материала, поэтому в расчетах магнитная проницаемость в этой области принята равной магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$ . Паз упрощенной формы имеет прямоугольное поперечное сечение, однако это не влияет на картину распределения магнитного поля в пазу, за исключением области вблизи клина, и позволяет в расчетах принять форму паза прямоугольной.

**Определение граничных условий.** С учетом допущений краевая задача имеет вид:

$$\begin{aligned} W: \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} &= j\omega\mu_0 s A_z - \mu_0 J; \\ G_1: A_z &= A_0; \end{aligned}$$

$$G_2: \frac{\partial A}{\partial n} = 0,$$

где  $W$  – область решения;  $G_1$  – граница фальца (паза);  $G_2$  – граница поверхности сердечника и основной изоляции;  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $J = I_m / S_b$ ;  $I_m$  – ток в проводнике;  $S_b$  – площадь поперечного сечения витка обмотки статора.

Первое граничное условие  $A_z = A_0$ , при определении значения  $A_0$  считается, что полный ток в проводнике равен  $I_m$ . Коэффициент увеличения электрического сопротивления обмотки статора может быть вычислен по формуле

$$K_r = \frac{R_{\sim}}{R_{\underline{\sim}}} = \frac{\int_{S_b} \left| \frac{\partial A_z}{\partial z} \right|^2 ds}{\int_{S_b} J_z^2 ds} = \frac{\int_{e=1}^E (J_{eR}^2 + J_{eL}^2) D_e}{\int_{S_b} J_z^2 ds},$$

где  $R_{\underline{\sim}}$  – электрическое сопротивление обмотки статора, обтекаемой постоянным током (вытеснение тока отсутствует);  $R_{\sim}$  – электрическое сопротивление обмотки статора, обтекаемой переменным током (с учетом вытеснения тока из проводника);  $J_z$  – начальное значение плотности тока в проводнике (без учета эффекта вытеснения тока);  $J_z$  – значение плотности тока, установленное в процессе расчета (с учетом эффекта вытеснения тока);  $J_{eR}^2$ ,  $J_{eL}^2$  – активные и реактивные составляющие плотности тока в элементе  $e$ , полученные расчетным путем;  $D_e$  – площадь поперечного сечения расчетного элемента  $e$ .

Были рассчитаны значения коэффициента увеличения сопротивления каждого витка обмотки статора и сопоставлены с его значениями, полученными аналитическим методом расчета. Расчеты показали, что коэффициент увеличения сопротивления монотонно растет по высоте паза, его значения в радиальном направлении, определенные двумя методами, практически не отличаются друг от друга (разница не превышает 0,5%).

Вышеизложенным методом можно рассчитать потери на вихревые токи в обмотке статора и определить температурное поле.

**Расчет и анализ трёхмерного (3D) температурного поля статора с учетом старения электрической изоляции.** Описание модели. Система охлаждения в аксиальном и радиальном направлениях симметрична, поэтому область решения задачи в осевом направ-

лении может быть задана на половине длины сердечника статора, а в тангенциальном – на одном зубце. Для упрощения расчётов приняты следующие допущения:

по причине радиальной симметрии через центральные поверхности паза и зубца теплообмен отсутствует;

с учетом симметрии охлаждаемой конструкции полагаем, что в сечении, проходящем через центр статора, теплообмен отсутствует;

коэффициенты теплопроводности прокладок, витковой и пазовой электрической изоляции одинаковы;

температура воздуха в вентиляционных каналах линейно изменяется в радиальном направлении;

теплопроводность поверхностей зубца и ярма равна среднему по объему значению.

*Уравнение трёхмерной стационарной теплопроводности и вариация функционала.* В анизотропной среде уравнение трёхмерной стационарной теплопроводности в прямоугольных координатах принимает вид:

$$l_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + l_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + l_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = q;$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_P} = 0;$$

$$- l \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{S_Q} = a(T - T_f),$$

где  $T$  – температура любой точки в области решения;  $S_P$  – площадь области, состоящей из  $S_1, S_4$  поверхностей с теплоизоляцией;  $S_Q$  – площадь области, состоящей из  $S_5, S_9$  поверхностей охлаждения;  $l_x, l_y, l_z$  – коэффициенты теплопроводности по указанным направлениям;  $q$  – плотность источников тепловыделения (потери);  $a$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_f$  – температура окружающей среды.

Применяя метод вариаций, запишем следующий функционал:

$$w(T) = \int_V \frac{1}{2} l_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + l_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + l_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - T_q \int_{S_Q} dV + \frac{1}{2} \int_{S_Q} a(T - T_f) T dS = \min,$$

где  $V$  – объем области решения задачи.

Определив экстремум функционала как  $\delta w / \delta T = 0$ , получим уравнение трехмерного температурного поля, выраженное через конечные элементы:

$$KT = F,$$

где  $T$  – вектор-столбец неизвестных значений температуры в узлах;  $F$  – вектор-столбец тепловой на-

грузки узлов;  $K$  – общая матрица жесткости температуры.

Данное уравнение позволяет определять температуру в любой точке области решения.

*Определение коэффициентов теплоотдачи для различных узлов конструкции турбогенератора.* Коэффициент теплоотдачи на поверхности зубца в радиальных вентиляционных каналах

$$a_i = \frac{1 + 0,25V_1}{0,045},$$

на поверхности ярма

$$a_y = \frac{1 + 0,25V_2}{0,045},$$

где  $V_1, V_2$  – средние значения скорости воздуха в радиальных вентиляционных каналах зубца и ярма.

Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности сердечника статора

$$a_R = \frac{1 + 0,25V_w}{0,045};$$

скорость потока воздуха в осевом направлении в спинке сердечника статора принята равной  $V_w = 5$  м/с.

Коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности сердечника статора

$$a_r = \frac{1}{10 \times a} \times 0000,$$

где  $1/a$  зависит от окружной скорости ротора  $V_n = rdf$  ( $d, f$  – диаметр и частота вращения ротора).

Коэффициент теплоотдачи в вентиляционных каналах со стороны изоляции

$$a_j = \frac{1 + 0,25V_j}{0,045},$$

где  $V_j$  – среднее значение скорости потока в вентиляционных каналах.

**Расчет и анализ температурного поля при старении электрической изоляции обмотки статора.** Влияние изменения теплопроводности на температурное поле статора в результате старения электрической изоляции стержня. С помощью трехмерного метода конечных элементов определено температурное поле статора для номинального режима работы турбогенератора. Расчетное значение максимальной температуры изоляции обмотки статора составляет 102,4 °С, установленное опытным путем 108 °С. Близкие расчетное и опытное значения температуры свидетельствуют об адекватности предлагаемого метода расчета.

Эффект вытеснения тока в верхние витки обмотки статора стимулирует их более сильный нагрев и, как следствие, более интенсивное старение их изоляции. Это обстоятельство учитывалось при исследовании влияния старения изоляции на тем-

пературное поле — рассматривался процесс старения изоляции только верхних витков обмотки статора.

На рис. 1 представлено распределение температурного поля в самом горячем сечении обмотки статора в номинальном режиме работы машины. Анализ показывает, что максимальная температура  $109,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  отмечена в изоляционном слое 17-го стержня обмотки статора, минимальная  $101,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  наблюдается в слое изоляции 50-го стержня со стороны гофрокартона, корпусная изоляция нагревается до  $108,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , максимальная температура в зубце сердечника статора составляет  $89,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для оценки влияния старения изоляции стержня на распределение температуры генератора выполнено моделирование температурного поля статора при некоторых условиях старения изоляции.

Коэффициент теплопроводности витковой изоляции с 1-го по 8-й стержень в верхней части обмотки статора со стороны гофрокартона снижается с  $0,23$  до  $0,15$ ; рассчитанное температурное поле статора показано на рис. 2.

Как следует из рис. 2, температурное поле верхней части обмотки статора распределено симметрично. Генератор в номинальном режиме работы

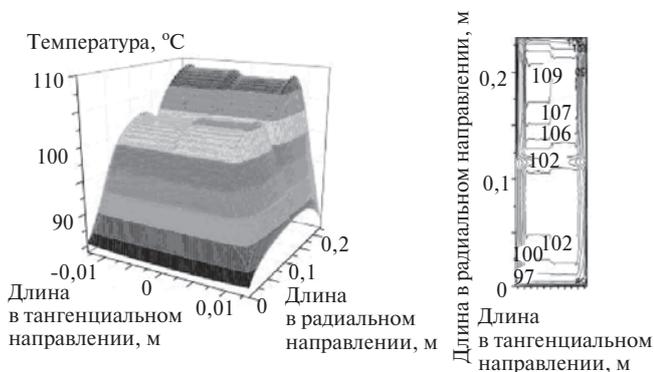


Рис. 1. Температурное поле обмотки статора в номинальном режиме работы

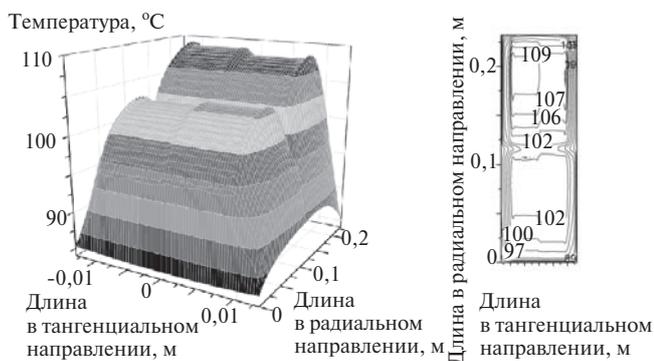


Рис. 2. Температурное поле при старении изоляции стержней с 1-го по 8-й в верхней части обмотки статора

имеет аналогичную картину распределения температур. Температура верхней части обмотки статора максимальна в слое изоляции 17-го витка, а минимальная  $101,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  — в слое изоляции 50-го витка. В пазовой изоляции и сердечнике статора максимальная температура составляет  $109$  и  $89,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Приведенный выше анализ результатов расчета температурного поля турбогенератора показывает, что старение изоляции незначительно влияет на температурное поле. В номинальном режиме работы максимальная температура составляет  $108,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в процессе старения изоляции она может подняться до  $108,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Влияние коэффициента теплопроводности подвергнутой старению пазовой изоляции на температурное поле статора. На рис. 3 представлено распределение температурного поля в результате старения пазовой изоляции и сопутствующего уменьшения коэффициента теплопроводности с  $0,23$  до  $0,15$ .

Из рис. 3 видно, что температура обмотки статора увеличивается примерно на  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  в результате старения пазовой изоляции. При этом максимальная температура верхней части обмотки статора увеличивается с  $109,2$  до  $119\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а самая высокая температура — в 16-м стержне. Минимальная температура верхней части обмотки статора увеличивается с  $101,1$  до  $108,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура пазовой изоляции обмотки статора в результате старения увеличивается с  $108,9$  до  $118,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура в сердечнике статора не изменяется.

Подсчитано, что пазовая изоляция, находящаяся достаточно далеко от гофрокартона, имеет максимальный градиент температуры в тангенциальном направлении. Максимальная разница температур на внутренней и внешней сторонах изоляции может достигать  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Влияние старения электрической изоляции и сопутствующего ей изменения коэффициента тепло-

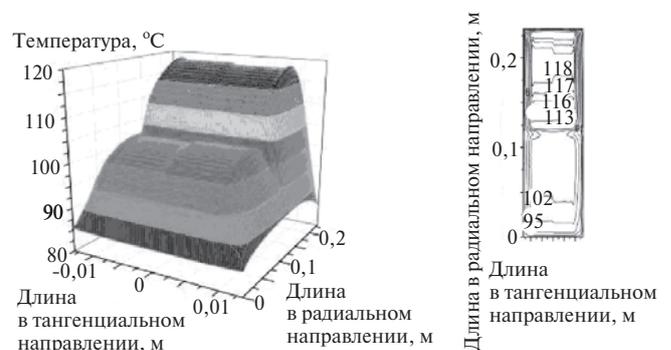


Рис. 3. Температурное поле в верхней обмотке статора в результате старения пазовой изоляции

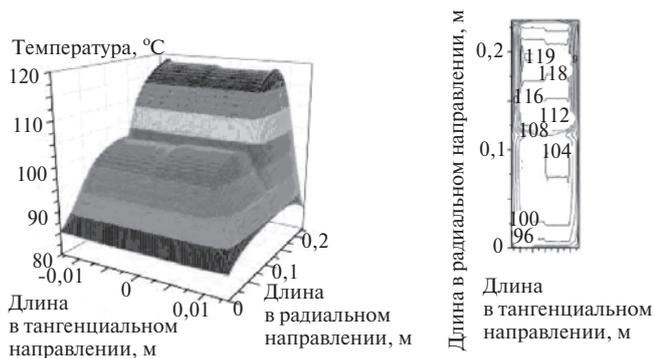


Рис. 4. Температурное поле в пазовой и витковой (с 12-го по 19-й стержень) изоляции в верхней части обмотки статора

проводности на температурное поле статора. На рис. 4 показано температурное поле в верхней части обмотки статора в слоях изоляции с 12-го по 19-й стержень, расположенных близко к гофрокартону. В процессе старения пазовой изоляции ее теплопроводность снизилась с 0,23 до 0,15.

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что исследуемые температурные поля практически не отличаются друг от друга. Максимальная температура в верхней части обмотки статора равна 119,1 °С. Минимальное 109 °С и максимальное 119,1 °С значения температуры имеет в результате старения пазовая изоляция в области с 12-го по 19-й стержень верхней части обмотки статора. То же самое распределение имеют значения температуры при отсутствии старения изоляции. Результаты расчета показывают, что возникновение экстремальных значений температуры в некоторых областях не зависит от старения изоляции, не изменяется и температура сердечника.

\* \* \*

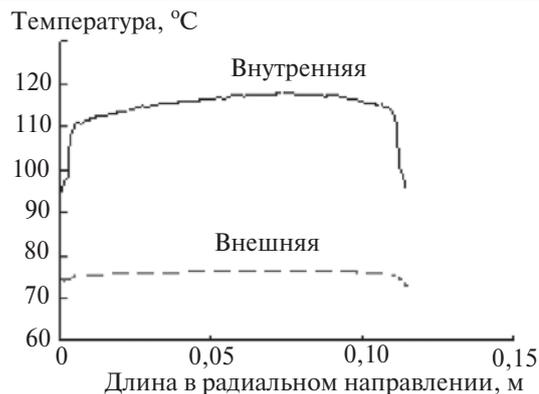


Рис. 5. Температурные профили по обе стороны пазовой изоляции

На рис. 5 приведены температурные профили, показывающие разницу значений температуры на внутренней и наружной сторонах пазовой изоляции, удаленной от гофрокартона, при этом максимальная разница также составляет 40 °С.

В заключение сделаем вывод, что при старении изоляции стержней обмотки статора уменьшается ее теплопроводность, однако это мало влияет на температурное поле в пазу и сердечнике статора. Старение изоляции стержней обмотки статора практически не зависит от ее температуры.

[23.01.13]

А в т о р ы : *Ли Вэйли* окончил очную аспирантуру в Отделе (Институте) электроэнергетических проблем РАН (руководитель – акад. Я.Б. Данилевич). Защищал диссертацию и получил ученую степень кандидата технических наук. Профессор Харбинского университета науки и техники (КНР).

### К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).

**Сюе И.** – доцент Харбинского университета науки и техники (КНР).

**У Чжэньси** – магистр Харбинского университета науки и техники (КНР).