

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА ПРИ ПУСКЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Кучинский К.А., к.т.н.
Институт электродинамики НАН Украины
Украина, 03680, Киев-57, пр. Победы, 56.
тел. (044) 441-25-64.

Описано методику квазістаціонарного розрахунку методом скінченних елементів термомеханічних характеристик ізоляції обмотки статора при пуску турбогенератора ТГВ-200. Наведено результати досліджень переміщень та напружень вузлів стержня у його активній та лобовій частинах, які виникають у процесі пуску.

Описана методика квазистационарного расчета методом конечных элементов термомеханических характеристик изоляции обмотки статора при пуске турбогенератора ТГВ-200. Приведены результаты исследований возникающих в процессе пуска перемещений и напряжений узлов стержня в его активной и лобовой частях.

В настоящее время большинство энергетических электромашин и, в частности, турбогенераторов (ТГ) ТЭС и АЭС, полностью отработали свой расчетный ресурс. Поэтому важнейшей проблемой в энергетическом электромашиностроении является необходимость продления надежной и эффективной эксплуатации ТГ сверх нормативных сроков, установленных соответствующими инструкциями и стандартами.

Необходимо учитывать, что современный этап развития электроэнергетики характеризуется маневренностью ТГ АЭС по реактивной мощности, маневренностью по активно-реактивной мощности, частыми пусками и остановами ТГ ТЭС и ГЭС, обусловленными дефицитом активных и реактивных мощностей. При этом возрастает преимущественное влияние частых циклов пуск - останов на увеличение повреждаемости ТГ и ускоренный износ различных его узлов в маневренных режимах работы.

Наблюдения об отказах и повреждениях узлов ТГ позволили установить, что основными причинами повреждений статора ТГ мощностью 160 - 320 МВт являются повреждения активной стали и обмоток вследствие местных перегревов, ослабления прессовки активной стали и ее вибрации, ослабления пазовых клиньев и крепления лобовых частей обмотки [1].

Как отмечается в работе [10], степень ослабления прессовки сердечника статора существенно зависит от уровней нагрева его железа и обмотки. Существенная неравномерность усилий под гайками стяжных ребер на ТГ мощностью 200, 300 МВт может привести к критическим механическим напряжениям в сердечнике, в особенности в зоне распорок. Вклад в деградацию статора ТГ вносят и термомеханические воздействия в маневренных режимах эксплуатации. Численные эксперименты позволили количественно оценить вклад циклических температурных воздействий на термомеханику статора и определить предельные случаи, когда температурные воздействия могут представлять опасность для сердечника.

Режимы пуска и останова - характерные маневренные режимы ТГ. При изменении нагрузки в основных узлах ТГ возникают неравномерные тепловыде-

ления, что приводит к взаимным перемещениям различных его конструктивных частей.

Повышение локальных тепловых нагрузок, значительное увеличение нагрева активных и концевых частей сердечника статора может привести к его интенсивной деградации и повреждаемости.

Взаимные перемещения стержней обмотки относительно железа статора в связи с различием их коэффициентов теплового расширения могут приводить к повреждениям изоляции и деформациям обмотки.

В работе исследуется влияние нестационарного температурного поля на величины термомеханических перемещений и напряжений в элементах изоляции стержня обмотки статора со стороны турбины в процессе пуска турбогенератора ТГВ-200 мощностью 200 МВт от нуля до номинального значения нагрузки.

Для получения наиболее полных результатов исследования проводились численно при помощи метода конечных элементов (МКЭ) [4, 8].

Общепринятая формулировка МКЭ предполагает отыскание поля перемещений на основе данных температурного поля и термомеханических коэффициентов применяемых материалов, после чего вычисляются компоненты деформаций и напряжений в элементах с учетом соответствующих начальных и граничных условий.

Перемещения рассчитываются в узлах сетки, накладываемой на исследуемую область (железо статора, медь обмотки, изоляция), деформации и напряжения - в элементах.

В процессе минимизации потенциальной энергии упругого тела получают интегралы, которые входят в уравнения для элементов [8]:

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV. \quad (1)$$

$$\{f\} = - \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} dV - \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV - \int_S [N]^T \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} dS - \{P\}, \quad (2)$$

где $[B]$ - матрица градиентов, связывающая деформации и перемещения; $[D]$ - матрица упругих констант, описывающая механические свойства; $\{\varepsilon_0\}$ - начальная деформация элемента, связанная с тепловым расширением; $[N]$ - матрица функций формы; X, Y, Z - объемные силы; P_x, P_y, P_z - поверхностные нагрузки; $\{P\}$ - вектор-столбец узловых сил.

Для решения задачи в случае плоского напряженного состояния используем треугольный симплекс-элемент с шестью компонентами узловых перемещений.

В результате минимизации матрица жесткости элемента записывается как:

$$[k] = [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot t \cdot S, \quad (3)$$

где t - толщина элемента, S - его площадь.

Вектор нагрузки элемента, обусловленный тепловым воздействием:

$$\{f\} = [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \cdot t \cdot S. \quad (4)$$

Матрица жесткости конечного элемента устанавливает однозначную связь между векторами узловых усилий и узловых перемещений.

Выражения для матриц градиентов, упругих констант, вектора начальной тепловой деформации элемента подробно рассматриваются в работе [7]

Полная система уравнений элемента для расчета неизвестных перемещений U в узлах:

$$[k] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} = \{f\}. \quad (5)$$

Полученная система алгебраических уравнений разрешается методом блочного исключения по Гауссу.

После определения перемещений в узлах компоненты деформации в элементе определяются решением системы:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

Компоненты напряжений $\{\sigma\}^T = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]$ в элементах вычисляются по закону Гука:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \quad (7)$$

либо через узловые перемещения:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot [B] \cdot \{U\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\}. \quad (8)$$

Приведенные выше теоретические положения реализованы в виде пакета прикладных программ для ПЭВМ на языке ФОРТРАН.

Областью исследований являлась наиболее нагретая половина нижнего стержня (пазовая и лобовая части) обмотки статора ТГВ-200 со стороны турбины.

Для расчета термомеханических характеристик использовались установившиеся (экспериментальные) пространственные распределения уровней нагревов меди, изоляции стержня и основных составляющих сердечника статора (коронки, середина, основания зубцов, ярмо) в аксиальном направлении от середины генератора до концевых зон со стороны турбины в номинальном режиме по результатам работ [2, 9].

Для исследования перемещений и напряжений использовались следующие коэффициенты теплового расширения, модули упругости и коэффициенты Пуассона соответственно:

1 - для изоляции [6]:

$$\alpha = 1,35 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}, E = 1,85 \cdot 10^4 \text{ МПа}, \mu = 0,39;$$

2 - для меди [6]:

$$\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}, E = 1,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \mu = 0,33;$$

3 - для сердечника статора [3]:

$$\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ\text{C}, E = 1,25 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \mu = 0,30.$$

Предполагалось, что процесс пуска ТГВ-200 из холодного состояния осуществлялся за 20 мин (т.е. скорость набора нагрузки от нуля до номинальной мощности составляла 10 МВт/мин). При этом собственно нестационарный тепловой процесс рассматривался для промежутка времени 50 мин с целью достижения температурами соответствующих узлов статора (стали сердечника, меди обмотки, изоляции стержня) своих установившихся значений (или достаточного приближения к ним).

На первом этапе предварительно рассчитывались перемещения на половине сердечника статора в аксиальном сечении в зависимости от времени по известному соотношению:

$$u_{i \text{ cp}}(t_i) = \alpha_{Fe} \cdot l_{0 \text{ Fe}} \cdot T_{i \text{ Fe}}(t_i), \quad (9)$$

где $l_{0 \text{ Fe}} = 2,5 \text{ м}$ - начальная длина половины сердечника статора.

Изменение температуры стали $T_{i \text{ Fe}}(t_i)$ в интервале времени $\Delta t_{0 \div 20} = 0 \div 20$ мин описывается зависимостью:

$$T_{iFe}(t_i) = T_{(i-1)Fe}(t_{i-1}) + \frac{T_{ном Fe}}{\Delta t_{0 \div 20}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T_{Fe}}} \right), \quad (10)$$

где $T_{iFe}(t_i)$ - температура в определенной пространственной точке сердечника статора в момент времени t_i ; $T_{(i-1)Fe}(t_{i-1})$ - соответственно температура сердечника статора в момент времени t_{i-1} ; $T_{ном Fe}$ - установившаяся температура сердечника статора в режиме номинальной нагрузки; $\Delta t_{0 \div 20} = 20$ мин - время процесса пуска; t_i - текущий момент времени; $T_{Fe} = 10$ мин - тепловая постоянная времени железа статора.

В промежутке времени $\Delta t_{20 \div 50} = (20 - 50)$ мин предполагается, что кривая нагрева описывается суммой экспонент:

$$T_{iFe}(t_i) = \frac{T_{ном Fe}}{\Delta t_{0 \div 20}} \sum_{k=0}^{\Delta t_{0 \div 20}-1} \left(1 - e^{-\frac{t_i - k\Delta t}{T_{Fe}}} \right), \quad (11)$$

где $\Delta t = 1$ мин - шаг по времени нестационарного процесса нагрева. На рис. 1 показано изменение нагрева в середине модели сердечника статора (кривая 1).

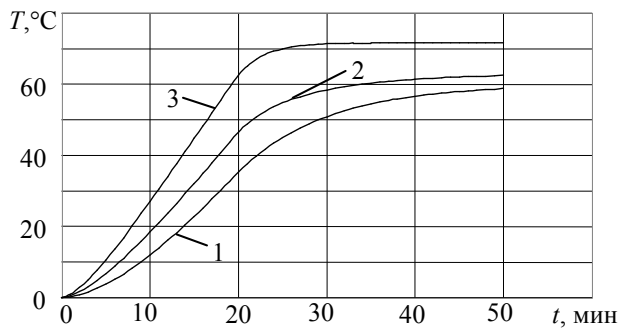


Рис. 1. Нагрев сердечника статора и изоляции стержня при пуске ТГВ-200

Полученные величины перемещений сердечника статора для каждого момента времени t_i (рис. 2) служат граничными условиями I рода для узлов модели лобовых частей обмотки в местах вязки стержней к опорным кронштейнам и кольцам бандажами из стеклошнура.

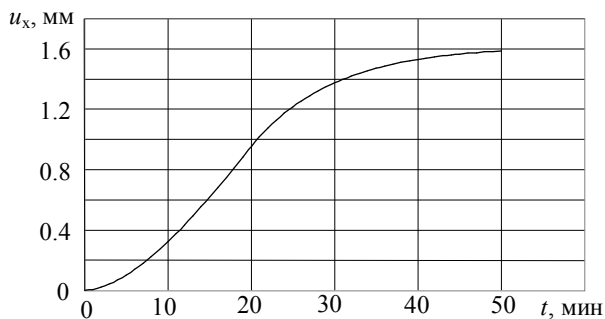


Рис. 2. Перемещения U_x узлов в середине модели сердечника статора при пуске ТГВ-200

Относительно характера нагрева изоляции в пазовой и лобовой частях стержня при пуске ТГ необходимо отметить следующее. Результаты работы [5] показали, что “изоляция в электрических машинах (ЭМ) нагревается значительно быстрее стали, а с медью – одинаково, и для правильного выбора мощности ЭМ при нерегламентированных перегрузках ее по току следует учитывать постоянную времени нагрева меди обмоток, поскольку температура меди и изоляции одинакова, а основным информационным параметром о надежной работе ЭМ является температура изоляции”. Таким образом, нагрев изоляции в зоне лобовых частей описывается аналогичными (10) и (11) зависимостями:

в интервале времени $\Delta t_{0 \div 20} = (0 - 20)$ мин

$$T_{i\text{ лоб}}(t_i) = T_{iCu}(t_i) = T_{(i-1)Cu}(t_{i-1}) + \frac{T_{ном Cu}}{\Delta t_{0 \div 20}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T_{Cu}}} \right), \quad (12)$$

где $T_{Cu} = 3$ мин - тепловая постоянная времени меди обмотки;

в интервале времени $\Delta t_{20 \div 50} = (20 - 50)$ мин

$$T_{i\text{ лоб}}(t_i) = T_{iCu}(t_i) = \frac{T_{ном Cu}}{\Delta t_{0 \div 20}} \sum_{k=0}^{\Delta t_{0 \div 20}-1} \left(1 - e^{-\frac{t_i - k\Delta t}{T_{Cu}}} \right). \quad (13)$$

В пазовой же части стержня (активной зоне ТГ) температуры изоляции для каждого момента времени принимались равными средним значениям между уровнями нагревов стали и меди с учетом соответствующего характера их изменения.

Повышение температур изоляции при пуске ТГВ-200 в середине пазовой и лобовой частей стержня обмотки отражает рис. 1 (соответственно кривые 2 и 3).

Приближенное численное решение МКЭ задачи термоупругости имеет вид компактного ряда значений перемещений в узлах и напряжений в элементах модели.

Представление об изменении величин узловых перемещений по оси x на внешней границе изоляции в середине пазовой (кривая 1) и лобовой (кривая 2) частей стержня обмотки в зависимости от времени дает рис. 3.

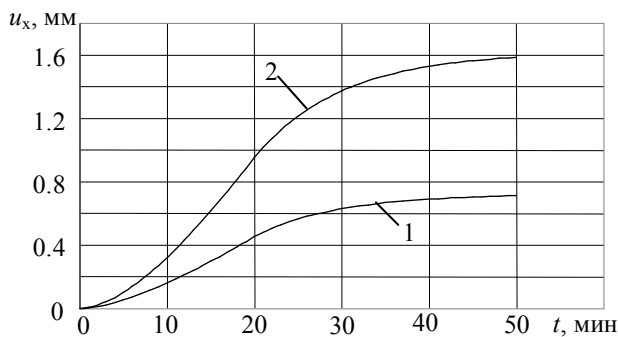


Рис. 3. Перемещения U_x узлов изоляции в середине пазовой и лобовой частей стержня обмотки статора при пуске ТГВ-200

Из полученных результатов следует, что нелинейный характер изменения узловых перемещений изоляции обусловлен соответствующими начальными и граничными условиями в исследуемой области. Максимальные величины наблюдаются в конце процесса пуска и зависят от уровней нагревов стали зубца и меди обмотки.

В работе [4] отмечается, что напряжения в материале, находящемся внутри конечного элемента, определяются разностью между существующими и начальными деформациями тела, обусловленными температурными воздействиями.

Компоненты термомеханических напряжений в элементах изоляции нижнего стержня при пуске ТГ приведены на рис. 4 (кривые 1, 2 - соответственно по осям x и y в середине пазовой части; кривые 3, 4 - по осям x и y в середине лобовой зоны).

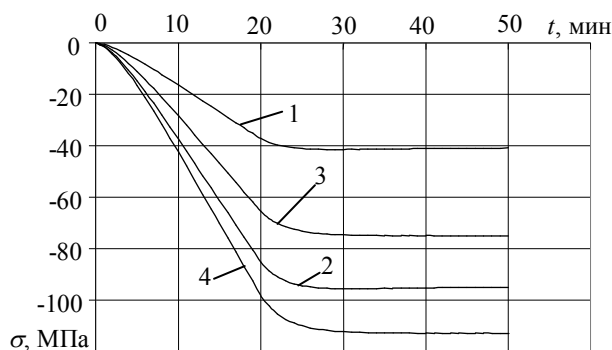


Рис. 4. Напряжения σ_x , σ_y в элементах изоляции в середине пазовой и лобовой частей стержня обмотки статора при пуске ТГВ-200

Результаты исследований показали, что рассчитанные значения термомеханических напряжений в элементах изоляции по оси x при пуске ТГ в конце процесса набора нагрузки по абсолютной величине существенно меньше предела ее прочности (80 - 90 МПа) (кривые 1, 3), а по оси y близки или даже превышают ее разрывную прочность.

Таким образом, неравномерный характер нагрева ТГ в кратковременном режиме пуска

вызывает взаимные перемещения обмотки и сердечника, дополнительные и уже опасные термомеханические напряжения материалов, что повышает износ изоляции и может привести к снижению эксплуатационной надежности машины. Кроме того, при большом числе тепловых циклов ТГ (периодические пуски - остановки) возможны повреждения как в концевых зонах, так и в средней части статора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе описана методика квазистационарного численного расчета термомеханических характеристик изоляции стержня обмотки статора при пуске турбогенератора.

2. Выявлены общие закономерности распределения перемещений и напряжений в элементах при работе ТГ с переменной нагрузкой.

3. В конце процесса набора нагрузки значения термомеханических напряжений в элементах изоляции по оси y близки или даже превышают ее разрывную прочность, что может привести к снижению надежности машины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Азбукин Ю.И., Аврух В.Ю. Модернизация турбогенераторов. - М.: Энергия, 1980. - 232 с.
- [2] Беднарчук Ю.В., Гринченко Н.Г., Езовит Г.П. и др. Исследования режимов и усовершенствование конструкций мощных турбогенераторов (турбогенераторы типа ТГВ-200 и ТГВ-200М). - К: Наук. думка, 1972. - 178 с.
- [3] Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. - Л.: Наука, 1986. - 184 с.
- [4] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике.-М.: Мир, 1975. - 541 с.
- [5] Карпенко В.Н., Политучий А.И. Моделирование процесса многоступенчатого нагрева электрических машин//Техн. электродинамика. - 2002. - Тем. вып. Ч.5. - С. 35 - 38.
- [6] Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах: Возникновение и методы выявления дефектов. - М.: Энергоиздат, 1981. - 256 с.
- [7] Кучинский К.А. Исследование термомеханических перемещений и напряжений в изоляции статорной обмотки мощного турбогенератора//Электротехника і Електромеханіка. - 2003. - № 1. - С. 60 - 63.
- [8] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов.-М.: Мир, 1979.- 392 с.
- [9] Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И. Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. - К.: Наук. думка, 1985. - 208 с.
- [10] Шидловский А.К., Федоренко Г.М., Кузьмин В.В. Фундаментальные и прикладные исследования в области энергетического электромашиностроения на пороге III-го тысячелетия//Новини енергетики. - 2001. - Спец. вип. № 9. - С. 20 - 28.

Поступила 28.09.2003