

## ТЕПЛОВЫЕ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СТАТОРА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТГВ-200 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВЕНТИЛЯЦИИ СТЕРЖНЕЙ ОБМОТКИ

**К.А.Кучинский**, канд.техн.наук,  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

*Численно исследованы температурные и термомеханические нагрузки в элементах статора в процессе пуска турбогенератора ТГВ-200 при различных расходах охлаждающего газа через вентиляционные трубки стержней обмотки. Показано, при каких величинах расходов максимальные температуры изоляции обмотки и термомеханические напряжения в ее элементах близки или превышают предельно допустимые значения для соответствующего класса нагревостойкости и предела прочности материала. Библ. 10, рис. 5.*

**Ключевые слова:** пуск, турбогенератор, охлаждение обмотки, термомеханические напряжения

Современный этап развития электроэнергетики характеризуется частыми пусками, остановами турбогенераторов (ТГ), маневренностью по активно-реактивной мощности. Около 80 % турбогенераторного оборудования электростанций Украины составляют отечественные ТГ, изготовленные Харьковским заводом «Электротяжмаш». В частности, на ТЭС находятся в эксплуатации 30 ТГ типа ТГВ-200, 4 ТГ ТГВ-200Д, 11 единиц ТГВ-200М мощностью 200 МВт. Срок службы этих машин в соответствии с нормативной документацией составляет 25–30 лет. К настоящему моменту 26 ТГ типа ТГВ-200 выработали свой ресурс (находятся в эксплуатации 35–50 лет), 8 ТГ эксплуатируются 20–29 лет. Тем не менее, они остаются основным генерирующим оборудованием в электроэнергетике, т.к. при отсутствии программ изготовления новых машин их замена в ближайшие годы нецелесообразна как по техническим, так и по экономическим соображениям.

Анализ функционирования нескольких ТГ ТГВ-300 и ТГВ-200, проведенный в последние годы силами ГП НИЦ «Укрэнергодиагностика», показал, что номинальные характеристики ТГ указанных типов после 30–40 лет работы не могут быть выдержаны вследствие изменения технического состояния основных узлов конструкций и систем их охлаждения с момента ввода в эксплуатацию. Например, турбогенераторы мощностью 300 МВт (Трипольская ТЭС) несут нагрузку в среднем 225 МВт, т.е. 0,75 от номинальной.

При изменении нагрузки ТГ в основных его узлах возникают неравномерные тепловыделения, что приводит к их взаимным перемещениям и появлению дополнительных напряжений как в самих греющихся элементах различных активных и конструктивных частей статора, так и в местах их крепления, вызванных ограничением теплового удлинения. В [4] отмечается, что основная причина повреждений машин заключается в термомеханических воздействиях на изоляцию магнитной системы и обмоток.

Происходящие в ТГ термомеханические процессы рассматривались ранее преимущественно с точки зрения оценки возникающего в торцевой зоне статора ТГ мощностью 200 МВт дополнительного давления прессования в рабочих режимах [1], перемещений обмотки относительно активного железа при пуске и останове по аналитическим соотношениям [10], изменений нагрева обмотки и сердечника статора ТГВ-200 при номинальных условиях охлаждения на основе экспоненциальных зависимостей и экспериментальных данных [7, 8].

Целью данной работы является проведение численных расчетных исследований влияния нестационарного температурного поля на величины термомеханических перемещений и напряжений в изоляции стержня обмотки статора со стороны турбины в процессе пуска ТГ мощностью 200 МВт

при отличных от номинальной величины расходах охлаждающего водорода для прогнозирования появления возможных дополнительных нагрузок в его элементах.

Лобовая часть обмотки статора, особенно на выходе из паза, является более уязвимой в отношении возможности механического повреждения, чем пазовая часть, так как выполнить надежное крепление лобовой части обмотки значительно труднее. При усовершенствовании конструкции крепления обмоток статоров в части повышения плотности укладки стержней и обеспечения стабильности их закрепления стремятся исключить радиальные и тангенциальные перемещения обмотки статора в лобовых частях, но одновременно обеспечить свободу аксиального перемещения при тепловом расширении [3].

Охлаждение меди обеспечивается циркуляцией водорода в 9-ти каналах каждого стержня, расположенных между двумя рядами элементарных проводников. Охлаждающий газ, проходя вдоль узких и длинных каналов стержня, постепенно нагревается, и температура стержня возрастает от места входа газа к его выходу. Как показали результаты исследований, перепад температуры между медью головки и охлаждающим газом в месте выхода его из стержня составляет в номинальном режиме при избыточном давлении водорода 3 кгс/см<sup>2</sup> 15–18 °С. Вдоль стержня температура водорода возрастает при том же давлении примерно на 50 °С [9].

Все неподвижные узлы и детали ТГ с водородным охлаждением уплотняются с помощью резиновых или пластиковых прокладок различной формы. От качества сборки деталей уплотнений в большой мере зависит газоплотность узла, что может явиться причиной ощутимых утечек водорода. Места повышенной утечки водорода из корпуса статора могут возникать в сварных швах корпуса, в плоскостях разъемов и их сопряжений с корпусом статора, а также в выводах обмотки статора и проводов теплового контроля из корпусов, во фланцевых соединениях трубопроводов и арматуре схемы газоснабжения ТГ.

Определение тепловых перемещений и напряжений в теле путем непосредственного интегрирования соответствующих дифференциальных уравнений и удовлетворения неоднородных граничных условий является сложной задачей. Приближенные методы решения задач термоупругости основаны, например, на обобщенном принципе минимума потенциальной энергии деформации совместно с выражениями, аппроксимирующими возможные напряжения. При этом предполагается, что тело находится под действием поверхностных и объемных сил при известном распределении температурного поля.

Исследование термомеханических перемещений, деформаций и напряжений на основе данных температурного поля и термомеханических коэффициентов применяемых материалов проводилось численно с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Перемещения рассчитываются в узлах сетки, накладываемой на исследуемую область (железо статора, медь обмотки, изоляция), компоненты деформаций и напряжений – в элементах.

В процессе минимизации потенциальной энергии упругого тела получаются интегралы, которые входят в уравнения для элементов [6]

$$[k] = \int_V [B]^T [D][B] dV, \quad \{f\} = - \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} dV - \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV - \int_S [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} dS - \{P\}, \quad (1,2)$$

где  $[k]$  – матрица жесткости;  $V$  – объем элемента;  $[B]$  – 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;  $S$  – площадь элемента;  $p_x, p_y, p_z$  – поверхностные нагрузки;  $\{P\}$  – вектор-столбец узловых сил.

Для решения задачи в случае плоского напряженного состояния используем треугольный симплекс-элемент с шестью компонентами узловых перемещений. Каждый из элементов характеризуется координатами вершин (узлов)  $i, j, m$  в декартовой системе координат, которые могут выбираться произвольно; толщиной  $t$ , свойствами материала – модулем упругости  $E$ , коэффициентами теплового расширения  $\alpha$  и Пуассона  $\mu$ , а также отклонением температуры от некоторого равновесного значения  $\Delta T$ .

Начальная деформация элемента, связанная с тепловым расширением,

$$\{\varepsilon_0\} = \alpha \Delta T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

(3)

Вектор нагрузки элемента, обусловленный тепловым воздействием (правая часть системы уравнений),

$$\{f\} = [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} t S = \frac{\alpha E t \Delta T}{2(1-\mu)} \begin{Bmatrix} b_i \\ c_i \\ b_j \\ c_j \\ b_m \\ c_m \end{Bmatrix}.$$

(4)

где  $t$  – толщина элемента,  $S$  – его площадь,  $b_i, b_j, b_m, c_i, c_j, c_m$  – коэффициенты матрицы, зависящие от геометрических координат вершин элемента.

Вектор узловых перемещений содержит перемещения в порядке возрастания номеров узловых точек. Матрица жесткости конечного элемента устанавливает однозначную связь между векторами узловых усилий и узловых перемещений.

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

$$[k] \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} = \{f\},$$

(5)

где переменные  $U$  с индексами «2» (т.е. в двумерной постановке задачи) соответствуют величинам перемещений по оси  $y$ , а с индексами «2-1» – по оси  $x$  декартовой системы координат [6]. Разрешается она методом блочного исключения по Гауссу. После определения перемещений в узлах компоненты деформации в элементе определяются решением системы

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

Известно, что напряжения в материале, находящемся внутри конечного элемента, определяются разностью между существующими и начальными деформациями тела, обусловленными температурными воздействиями. Таким образом, отличные от нуля компоненты напряжения  $\{\sigma\}^T = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]$  в элементах вычисляются либо по закону Гука

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} - [D] \{\varepsilon_0\},$$

(7)

либо через узловые перемещения:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{U\} - [D]\{\varepsilon_0\}.$$

(8)

Изложенные теоретические положения реализованы в виде разработанного автором пакета прикладных программ для ПЭВМ на языке ФОРТРАН.

Расчеты абсолютных установившихся температур меди в номинальном режиме на входе (середина модели) и выходе (со стороны турбины) для различных условий охлаждения стержня при температуре холодного газа на входе в обмотку 48 °С и соответствующей величине его расхода, опре-

деление постоянных времени нагрева меди и железа проводилось на основе результатов натуральных испытаний ТГВ-200 на Бурштынской ГРЭС [7, 8], а также с использованием данных [2]. При этом выделялись наибольшие из показаний термодатчиков (медно-константановых термопар, установленных непосредственно на металлическую поверхность исследуемой детали или сегментов сердечника, и термометров сопротивления) для измерения температуры активных частей по длине сердечника и охлаждающего газа. Полученные граничные значения являлись исходными данными для последующих тепловых и термомеханических исследований нестационарных процессов в элементах статора (сердечника, обмотки, изоляции) ТГВ-200.

Перемещения и напряжения исследовались при следующих коэффициентах теплового расширения, модулях упругости и коэффициентах Пуассона соответственно [3, 5]: 1 – для изоляции обмоток:  $\alpha_{изол.} = 1,35 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;  $E_{изол.} = 1,85 \cdot 10^4$  МПа;  $\mu_{изол.} = 0,39$ ; 2 – для меди обмоток:  $\alpha_{Cu} = 1,70 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;  $E_{Cu} = 1,10 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu_{Cu} = 0,33$ ; 3 – для сердечника статора:  $\alpha_{Fe} = 1,10 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;  $E_{Fe} = 1,25 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu_{Fe} = 0,30$ . Предполагалось, что процесс пуска ТГВ-200 из холодного состояния осуществлялся за 20 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) 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

$$u_{i\text{ эр}}(t_i) = \alpha_{Fe} l_{0Fe} T_{iFe}(t_i),$$

(9)

где  $l_{0Fe} = 2,5$  м – начальная длина половины сердечника статора ТГВ-200.

Полученные из (9) величины перемещений сердечника статора для каждого момента времени  $t_i$  раскладывались по осям  $x, y$  (соответственно кривые 1 и 2 на рис. 1) и являлись граничными условиями I рода для узлов модели лобовых частей обмотки в местах вязки стержней к опорным кронштейнам и кольцам бандажами из стеклошнура.

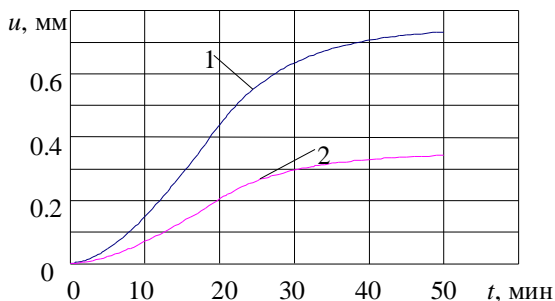


Рис. 1

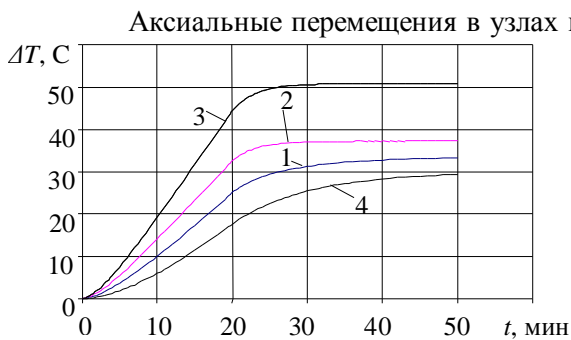


Рис. 2

Повышение температур элементов статора со стороны турбины при пуске турбогенератора ТГВ-200 при номинальном расходе охлаждающего газа отражает рис. 2 (соответственно кривые: 1 – изоляции  $\Delta T_{из.}(t)$  в середине пазовой части; 2 – меди  $\Delta T_{м.}(t)$  в середине пазовой части; 3 – изоляции и меди  $\Delta T_{из.}(t) = \Delta T_{м.}(t)$  в середине лобовой части модели половины верхнего стержня обмотки; 4 – модели сердечника статора  $\Delta T_{Fe}(t)$ ).

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

Приближенное численное решение МКЭ задачи термоупругости имеет вид компактного ряда значений перемещений в узлах и напряжений в элементах модели. Пуска достигали значений  $(0,715 \div 0,765)$  мм при снижении расхода охлаждающего газа  $(1 \div 0,66)$  от номинальной величины. В середине лобовой части величины радиально-аксиальных перемещений соответствовали задаваемым граничным значениям по рис. 1.

На рис. 3 показано изменение компонент термомеханических напряжений в элементах изоляции при пуске ТГВ-200 и номинальном расходе охлаждающего газа (обозначения кривых: 1, 2 – соответственно по осям  $x$  и  $y$  вблизи выхода стержня обмотки статора из паза; 3,

4 – по осям  $x$  и  $y$  в середине лобовой части стержня).

В ТГ с водородно-водяным охлаждением обмотка статора охлаждается дистиллятом, а сталь статора и ротора – водородом. Для данных машин при снижении расхода дистиллята ниже 0,5 номинального предусматривается отключение ТГ от сети не более, чем через 4 мин. после подачи аварийного сигнала. Применение регулирования расхода дистиллята через обмотку статора в целях поддержания его температуры является нецелесообразным [9].

Поскольку целью работы являлось определение допустимой величины снижения расхода охлаждающего газа по условию возникновения в изоляции обмотки статора опасных термомеханических напряжений при пуске ТГ, то для упрощения расчетов рассматривались варианты уменьшения расходов охлаждающего агента через стержень обмотки на 20 % и на 30 % (т.е. исследования соответственно при расходах 0,8 и 0,66 от номинального). Постоянные времени нагрева корректировались по отношению к номинальным условиям охлаждения обмотки в первом приближении пропорционально величине снижения расхода водорода. Результаты исследований изменений термомеханических напряжений в элементах изоляции при пуске турбогенератора ТГВ-200 и расходе охлаждающего газа, равном 0,8 от номинального, отражает рис. 4, а при расходе 0,66 от номинального – рис. 5 (обозначения кривых на рис. 4, 5 идентичны обозначениям на рис. 3).

Расчеты показали, что локальная температура меди стержня в лобовой части обмотки статора (на выходе горячего газа) в конце пуска ТГВ-200 уже при расходе, равном 0,8 от номинального, достигает  $T_M = \Delta T_M + T_{\text{хол.газа}} \approx 64 + 48 = 112 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Она превышает допустимую величину при эксплуатации (среднее значение  $105 \text{ } ^\circ\text{C}$  по термосопротивлению). При расходе же 0,66 от номинального температура повышается до значения  $T_M = \Delta T_M + T_{\text{хол.газа}} \approx 77 + 48 = 125 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

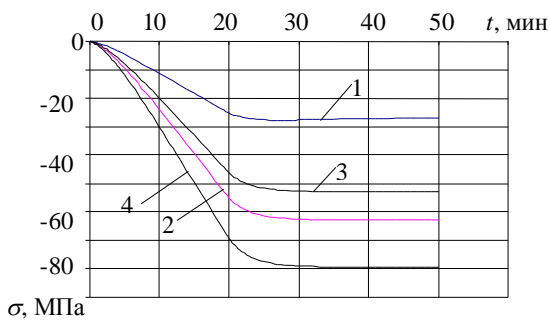


Рис. 3

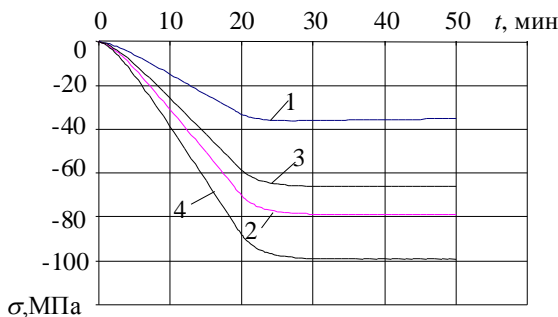


Рис.

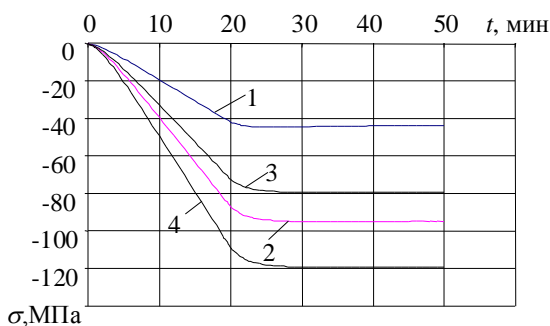


Рис. 5

Создание эффективной системы мониторинга теплового состояния работающего генератора весьма актуально, т.к. может повысить надежность функционирования действующего парка генераторов со сроком эксплуатации более 25 лет. Например, технология выполнения эффективной диагностики технического состояния мощных ТГ, разработанная НПО «ВЭИ Электроизоляция» (Россия), предусматривает проведение и предремонтной диагностики. Она, наряду с нормативными требованиями, включает в себя контроль и анализ функционирования систем охлаждения генератора [4]. При этом контроль массового расхода охладителя систем охлаждения водорода и обмотки осуществляется с помощью высокоточного ультразвукового расходомера «Tokimes», Япония (погрешность измерений составляет примерно 1 %). Температурные измерения проводятся по усовершенствованной методике тепловизионного контроля корпусных элементов работающей машины с прямым измерением основных тепловых параметров тепловизором NEC TH-9100, обеспечивающим чувствительность к перепаду температур (на водяных коллекторах газоохладителей) порядка  $0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Сканирующие тепловизионные системы дают возможность оценить степень развития дефекта, определить причину его возникновения и нарушений в работе системы охлаждения генератора по тепловой картине (повышенный уровень температуры элементов корпуса означает снижение эффективности системы охлаждения).

**Выводы.** 1. Рассчитанные значения термомеханических напряжений в элементах изоляции в пазовой и лобовой зонах по осям  $x$  и  $y$  в конце процесса набора

нагрузки при номинальном расходе охлаждающего газа в основном меньше предела ее прочности (40÷80 МПа [5]) и лишь по оси у в середине лобовой части в области креплений близки к нему. Во всех частях обмотки напряжения в изоляции монотонно увеличиваются до своего, соответствующего номинальному уровню нагрева, установившегося значения.

2. При снижении величин расходов охлаждающего агента до 0,8 и 0,66 от номинального компоненты напряжений по оси у в элементах изоляции вблизи выхода обмотки из паза близки к пределу ее прочности, а в конце процесса набора нагрузки в середине лобовой части в области креплений существенно превышают по абсолютной величине ее разрывную прочность.

3. По условиям нагрева обмотки и возможного возникновения недопустимых термомеханических напряжений в ней необходима предупредительная и аварийная сигнализация снижения расхода охлаждающего газа с последующей разгрузкой либо отключением генератора от сети в зависимости от степени уменьшения расхода по отношению к номинальному.

1. *Аврух В.Ю., Пикульский В.А., Чистиков А.А.* Исследование возможностей снижения термомеханических нагрузок в статорах турбогенераторов // Электрические станции. – 1986. – № 4. – С. 42–44.

*Avruch V.Yu., Pikulskii V.A., Chistikov A.A.* Study the possibilities for reducing thermomechanical loads stators turbogenerators // Elektricheskie stantsii. – 1986. – № 4. – P. 42–44. (Rus.)

2. *Борисенко А.И., Данько В.Г., Яковлев А.И.* Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – Москва: Энергия, 1974. – 560 с.

*Borisenko A.I., Danko V.G., Yakovlev A.I.* Aerodynamics and heat transfer in electric machines. – Moskva: Energiia, 1974. – 560 p. (Rus.)

3. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б.* Научные основы проектирования турбогенераторов. – Ленинград: Наука, 1986. – 184 с.

*Glebov I.A., Danilevich Ya.B.* Scientific principles of design of turbogenerators. – Leningrad: Nauka, 1986. – 184 p. (Rus.)

4. *Завидей В.И., Крупенин Н.В., Голубев А.В., Головичер В.А.* Новые аспекты технологии проведения тепловой диагностики вращающихся электрических машин // Энергетик. – 2007. – № 6. – С. 48–49.

*Zavidei V.I., Krupenin N.V., Golubev A.V., Golovicher V.A.* New aspects of the technology of thermal diagnostics of rotating electrical machines // Energetic. – 2007. – № 6. – P. 48–49. (Rus.)

5. *Кулаковский В.Б.* Работа изоляции в генераторах: возникновение и методы выявления дефектов. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 256 с.

*Kulakovskii V.B.* Operation of isolation in generators: Emergence and methods for detecting defects. – Moskva: Energoizdat, 1981. – 256 p. (Rus.)

6. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – Москва: Мир, 1979. – 392 с.

*Segerlind L.* Application of the method of finite elements. – Moskva: Mir, 1979. – 392 p. (Rus.)

7. *Счастливыи Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И.* Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. – Киев: Наукова думка, 1985. – 208 с.

*Schastlivyi G.G., Fedorenko G.M., Vygovskii V.I.* Turbo- and hydrogenerators at variable generation schedules. – Kiev: Naukova dumka, 1985. – 208 p. (Rus.)

8. *Федоренко Г.М., Бут А.А., Крамарский В.А. и другие.* Экспериментальные исследования нагрева турбогенератора ТГВ-200 с интенсифицированной системой охлаждения концевой зоны сердечника статора // Электрические станции. – 1981. – № 5. – С. 34–38.

*Fedorenko G.M., But A.A., Kramarskii V.A. i drugie.* Experimental researches of heat of a turbogenerator ТГВ-200 with an intensified cooling system of an end zone of the heart of a stator // Elektricheskie stantsii. – 1981. – № 5. – P. 34–38. (Rus.)

9. *Эксплуатация турбогенераторов с непосредственным охлаждением / Под общей редакцией Л.С.Линдорфа, Л.Г.Мамиконянца.* – Москва: Энергия, 1972. – 352 с.

*Exploitation of turbogenerators with direct cooling / Pod obshchei redaktsiei L.S.Lindorfa, L.G.Mamikoniantsa.* – Moskva: Energiia, 1972. – 352 p. (Rus.)

10. *Przybysz J.* Turbogeneratory. Eksploatacja i diagnostyka. – Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1991. – 184 p.

УДК 621.313.322

**К.А.Кучинский**, канд. техн. наук,

**Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

**Теплові й термомеханічні характеристики елементів статора в динамічному режимі турбогенератора ТГВ-200 при різних умовах вентиляції стержнів обмотки**

*Чисельно досліджено температурні й термомеханічні навантаження в елементах статора в процесі пуску турбогенератора ТГВ-200 при різних витратах охолоджуючого газу через вентиляційні трубки стержнів обмотки. Показано, при яких величинах витрат максимальні температури ізоляції обмотки й термомеханічні напруги в її елементах близькі або перевищують гранично допустимі значення для відповідного класу нагрівостійкості й межі міцності матеріалу. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** пуск, турбогенератор, охолодження обмотки, термомеханічні напруги.

**К.А.Kuchinskii,**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

**Thermal and thermomechanical characteristics of stator elements dynamically of turbogenerator ТГВ-200 under various conditions of ventilation rods winding**

*Temperature and thermomechanical loadings in elements stator are numerically investigated during start-up of turbogenerator ТГВ-200 at various charges of cooling gas through ventilating tubes of cores of a winding. It is shown, at what value of charges the maximal temperatures of isolation of a winding and thermomechanical stress in its elements are close or exceed maximum permissible values for a corresponding class of thermal stability and breaking point of a material. References 10, figures 5.*

**Key words:** start, turbogenerator, cooling winding, thermomechanical stress.

Надійшла 11.11.2011

Received 11.11.2011