

УДК 621.313.322

### ВЛИЯНИЕ НАРУШЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ДИСТИЛЛЯТА НА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА МОЩНОСТЬЮ 800 МВт

**К.А.Кучинский**, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: [kuchynskyv@mail.ru](mailto:kuchynskyv@mail.ru)

*Разработана методика компьютерного расчета термомеханических напряжений в изоляции обмотки статора турбогенератора с полным водяным охлаждением. В основу методики положен численный метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ. Проведен сравнительный анализ результатов расчетных исследований термомеханического состояния изоляции стержня обмотки статора турбогенератора мощностью 800 МВт в номинальном режиме с учетом изменения температурного состояния его элементов при снижении расхода воды. Установлено, при каких расходах воды и на каких участках стержня величины термомеханических напряжений достигают опасных значений, превышающих предел прочности материала. Библ. 8, рис. 3.*

**Ключевые слова:** турбогенератор, расход дистиллята, нагрев, термомеханические напряжения, предел прочности материала.

**Введение.** Общая электрическая мощность турбогенераторов (ТГ) с водяным охлаждением обмотки статора составляет более 50 % от установленной мощности всех электростанций Украины. К настоящему времени практически все эти ТГ эксплуатируются уже более 25 лет, а их замена в ближайшие годы нецелесообразна как по техническим причинам, так и по экономическим соображениям. Продолжение срока службы действующих электроустановок признано приоритетным направлением технического переоснащения электростанций [6]. При этом существенно важным является разработка и внедрение новых методов и средств технической диагностики основного оборудования, особенно при его работе под нагрузкой. Первостепенное значение приобретают вопросы совершенствования методов контроля и диагностики состояния обмотки статора ТГ.

В практике эксплуатации происходили пробои изоляции стержней обмотки с водяным охлаждением на турбогенераторах ТВВ-165-2, ТГВ-200М, ТГВ-500, ТЗВ-800-2, ТВВ-1000-2, ТВВ-1000-4. В этих генераторах температура обмотки измеряется термопреобразовательными сопротивлениями (ТС), наложенными на изоляцию каждого стержня со стороны слива дистиллята. Согласно нормативным документам признаками дефектов охлаждения являются повышение показаний ТС более 75 °С или значение разности максимальной и номинальной температур обмотки, превышающее 25 °С. Однако, точность измерений температуры таким способом явно недостаточна. Проведенные исследования подтвердили неэффективность штатной системы контроля при выявлении тепловых аномалий в обмотке [3]. Например, при проведении гидравлических испытаний стержней ТГ типа ТВВ-800-2 на проходимость во время ремонта было выявлено засорение каналов охлаждения стержней, имевших совсем не максимальную температуру (а именно – верхних стержней в пазах 8 и 27 и нижнего в пазу 24) [5]. Проходимость указанных стержней оказалась ниже нормы завода-изготовителя. Расход дистиллята через указанные стержни составил, соответственно, 80,6; 72,0; и 50,7 % от номинального. При этом ранее измеренные температуры этих стержней при нагрузке ТГ, близкой к номинальной, не превосходили допустимых значений. Это объясняется тем, что в процессе эксплуатации происходит ослабление крепления стержня обмотки в пазу сердечника, увеличение вибрации и, соответственно, нарушение плотности прилегания ТС к поверхности изоляции.

Перепад температуры на изоляции стержней при наличии таких дефектов охлаждения может достигать десятков градусов. При снижении расхода через стержни обмотки статора из-за полной или частичной закупорки полых проводников (например, вследствие образующихся в процессе эксплуатации медноокисных и других отложений на поверхности каналов) максимальная температура меди может превысить предельную для терморезистивной изоляции стержней типа «Слюдотерм» класса

«В» величину ( $130^{\circ}\text{C}$ ). А значения температур по показаниям соответствующих ТС при этом оказываются в пределах допустимых.

Наиболее опасным случаем является полная закупорка двух (и более) рядом расположенных полых проводников, приводящая к резкому повышению локальной температуры меди вокруг закупоренных каналов [2].

Температурные градиенты в пространстве и во времени обуславливают термоупругие силы, воздействующие на узлы и детали ТГ. При этом возникают дополнительные термомеханические напряжения, вызванные ограничением теплового удлинения как в самих греющихся элементах активных и конструктивных частей статора, так и в местах их крепления. Их величины могут превышать допустимые значения для соответствующего материала и приводить к повреждениям изоляции и деформациям обмотки.

Вследствие повышенного нагрева торцевой зоны сердечника статора и неравномерности температурного поля в его элементах в радиальном и аксиальном направлениях актуальной становится проблема исследования влияния термомеханических напряжений на состояние и надежность обмотки статора в месте выхода ее из пазовой части и в различных местах изгибов стержней в лобовой части.

Термометры сопротивления штатной системы термоконтроля теплового состояния верхнего стержня обмотки статора турбогенератора расположены в пазу на расстоянии 15 – 20 см от торца сердечника, что практически не позволяет получать информацию о максимальных нагревах в зоне крайних пакетов.

Значения термомеханических напряжений зависят от величин температур и налагаемых граничных условий во всех смежных элементах области, и расчет только лишь одного элемента (например, с максимальной температурой или с жестким закреплением каких-либо его граней) без учета физического состояния и геометрического положения соседних элементов и узлов некорректен: в частности, температуры в стержне достигают своих максимальных значений в лобовой части на сливе горячего дистиллята, а максимальные напряжения наблюдаются в местах выхода стержня из паза и креплений лобовой части, т.е. отнюдь не в узлах с максимальной температурой. Поэтому исходные предпосылки при постановке задачи следующие: предполагается, что температура по длине стержня имеет линейное распределение. Наибольшее значение температуры наблюдается на стороне турбины, где подогрев дистиллята в полых проводниках достигает своего максимума. Таким образом, при снижении расхода дистиллята распределение повышенных нагревов и термомеханических напряжений в стержне обмотки будет иметь место в геометрических точках по всей длине машины, а их максимумы – в торцевой зоне. В работе рассматриваются теплофизические и термомеханические характеристики изоляции стержня обмотки статора в аксиальном направлении на половине длины машины от середины сердечника до торцевой зоны со стороны турбины.

**Цель работы** – численная реализация обобщенной математической модели деформируемого твердого тела по теории упругости и разработка на ее основе комплексной методики расчета взаимосвязанных физических процессов для исследования и анализа возникающих вследствие неравномерного повышенного нагрева внутренних термомеханических напряжений в изоляции стержня обмотки статора мощного ТГ при наличии дефектов охлаждения.

Для решения указанных задач была выполнена серия компьютерных расчетов с целью получения значений термомеханических перемещений, деформаций и напряжений в элементах обмотки статора ТГ мощностью 800 МВт при различных величинах расхода охлаждающей воды через стержни. Необходимость компьютерного моделирования обуславливается значительной сложностью и зачастую невозможностью проведения испытаний на натуральных объектах в реальных условиях эксплуатации для исследования возникающих при дефектах охлаждения температурных градиентов и термомеханических напряжений, способных привести, при определенных условиях, к разрушению изоляции, пробоем обмотки и, в конечном итоге, аварии машины.

**Математическая модель и численная реализация методики расчета термомеханических процессов** базируются на основе численного решения задачи методом конечных элементов (МКЭ) в двумерной постановке в декартовой системе координат.

Рассматривался процесс термомеханического воздействия теплового режима на конструкцию двух сопряженных элементов (система стержни статора – железо статора) генератора. В связи с различием коэффициентов теплового расширения меди, стали сердечника и изоляции происходят деформации и взаимные перемещения конструктивных частей, в частности, стержней обмотки относительно железа или других элементов, на которых крепятся эти стержни.

По МКЭ отыскание поля перемещений связано с минимизацией потенциальной энергии упругого тела [7], в процессе которой получаются интегралы, входящие в уравнения для элементов. Матрица жесткости элемента (левая часть системы уравнений)

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

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

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

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;  $S$  – площадь элемента;  $V$  – объем элемента.

Для решения двумерной задачи 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  $\Delta T$ .

Полная система уравнений для элемента записывается как

$$[k] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} = \{f\}. \quad (3)$$

Полученная система большого порядка (равного удвоенному количеству узлов) разрешается методом блочного исключения по Гауссу.

На основе данных температурного поля и термомеханических коэффициентов используемых материалов после определения узловых значений вектора перемещений вычисляются компоненты деформаций в элементах с учетом соответствующих начальных и граничных условий

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

Компоненты напряжений  $\{\sigma\}^T = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}$  вычисляются либо по закону Гука

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\}, \quad (5)$$

либо через узловые перемещения

$$\{\sigma\} = [D] \cdot [B] \cdot \{U\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\}. \quad (6)$$

Теоретические положения реализованы в виде пакета прикладных программ для ПЭВМ на языке ФОРТРАН. Расчетной областью является наиболее нагретая половина стержня (пазовая и лобовая части) обмотки статора ТГ мощностью 800 МВт со стороны турбины [8] (рис. 1).

Верхний и нижний слои модели (для наглядности выделены с нарушением масштаба) соответствуют изоляции, средний слой (в радиальном направлении подразделялся на

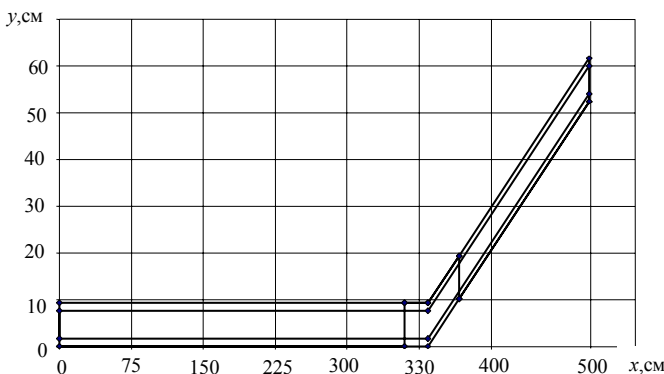


Рис. 1

2 слоя) – меди стержня. Таким образом, в радиальном направлении модель разделена на 5 "радиусов" и, соответственно, на 4 слоя. Количество узлов конечно-элементной сетки составляло 1255 (т.е. для определения векторов перемещений решалась система из 2510 уравнений), при этом число треугольных элементов равно 2000, ширина ленты матрицы коэффициентов после ее оптимизации – 14.

Вертикальными линиями в месте выхода обмотки из паза выделена «свободная» (от креплений) зона стержня (пазовая и лобовая части). В силу конструктивных особенностей принималось, что перемещения на левой вертикальной границе (середина стержня в активной зоне статора) по оси  $x$  отсутствуют. На дне паза и на границе стержневой обмотки статора (верхняя и нижняя горизонтальные линии до первой вертикальной на рис. 1) перемещения всех узлов модели по оси  $y$  также равны нулю. Здесь возможны перемещения только вдоль оси  $x$ .

**Анализ результатов расчета.** Ниже описаны результаты расчетных исследований термомеханических напряжений в изоляции стержня обмотки статора ТГ в режиме номинальной нагрузки при нормальном и половинном расходе охладителя.

На первом этапе предварительно проводился термомеханический расчет половины сердечника статора (от середины до торцевой зоны со стороны турбины) в аксиальном сечении. Полученные величины составляющих перемещений узлов статора по оси  $y$  для каждого момента времени задавались как граничные условия I рода в узлы модели стержня, в которых «осуществлялось» крепление лобовых частей. По оси  $x$  с учетом рекомендаций в работе [1] предполагалось, что крепление не препятствует перемещению лобовых частей в аксиальном направлении при тепловом удлинении прямой пазовой части обмотки статора.

Для расчета термомеханических характеристик в номинальном режиме использовались установившиеся распределения нагревов основных узлов статора в радиальном (по высоте стержня) и аксиальном (по длине) направлениях от середины генератора до концевых зон со стороны турбины [8]. Распределение температуры стержня по его длине аппроксимировалось по линейному закону, в изоляции пазовой части принималось равным средним значениям между нагревами меди обмотки и железа сердечника в каждом пространственном узле модели.

Перемещения и напряжения исследовались при следующих коэффициентах теплового расширения, модулях упругости и коэффициентах Пуассона соответственно [1, 4]:

- для изоляции  $\alpha_{изол.} = 1,35 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;  $E_{изол.} = 1,85 \cdot 10^4$  МПа;  $\mu_{изол.} = 0,39$ ;
- для меди  $\alpha_{Cu} = 1,70 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;  $E_{Cu} = 1,10 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu_{Cu} = 0,33$ ;
- для сердечника статора  $\alpha_{Fe} = 1,10 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ ;  $E_{Fe} = 1,25 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu_{Fe} = 0,30$ .

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

На рис. 2, 3 показаны величины и характер изменения термомеханических напряжений вдоль слоя 1 модели (в изоляции) по осям  $x$  и  $y$  (в дальнейшем кривые 1 и 2) в пазовой и лобовой частях стержня соответственно при номинальном расходе охладителя через стержень и при половинном расходе воды. Уменьшение расхода предполагалось равномерным по всем охлаждающим каналам. При этом максимальные превышения температуры меди стержня составляли соответственно  $20^\circ\text{C}$  и  $70^\circ\text{C}$ .

Анализ полученных результатов показал, что изменение напряжений в зоне вылета лобовой части носит нелинейный характер, что обусловлено соответствующими начальными и граничными условиями в исследуемой области и уровнями нагревов стали зубца, меди стержня и его изоляции. В

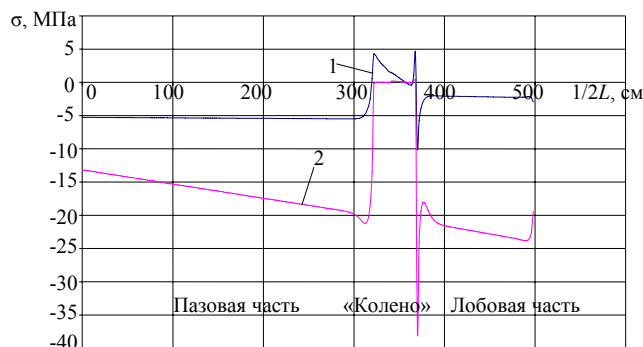


Рис. 2



Рис. 3

пазовой зоне величины напряжений монотонно увеличиваются от средней части сердечника статора к его торцу, при этом по оси  $x$  они значительно меньше, чем по оси  $y$ , что объясняется предположением свободного аксиального перемещения стержней и ограничением радиальных перемещений сверху за счет клина и снизу за счет прокладки и нижнего стержня.

«Пики» на выходе из паза и в месте начала креплений в лобовой части обусловлены как резким изменением граничных условий в этих так называемых «особых точках», так и чисто методическими свойствами (степенью дискретизации расчетной области) приближенного конечно-элементного подхода к решению задачи.

Как и следовало ожидать, в «свободной» зоне деформированного стержня (на его «колене») напряжения практически отсутствуют, а в лобовой части в зоне креплений они почти постоянны и определяются величинами накладываемых граничных условий по результатам термомеханического расчета сердечника статора (его узловых перемещений).

В [1] отмечается, что механическая прочность корпусной изоляции на разрыв составляет порядка  $60\div 70$  МПа ( $600\div 700$  кгс/см<sup>2</sup>) при температуре 20 °С, а при 100 °С – около 40 МПа.

Таким образом, для рассматриваемой математической модели при номинальных значениях температуры обмотки и расхода дистиллята через ее стержни компоненты напряжений в элементах изоляции по осям  $x$  и  $y$  вдоль длины стержня находятся в допустимых пределах.

При снижении расхода на 50 % компоненты напряжений по оси  $y$  в элементах изоляции вблизи выхода обмотки из паза и в местах креплений лобовых частей при номинальном режиме нагрузки превышают допустимые значения по пределу прочности материала (80 – 100 МПа) даже при максимальных температурах меди ниже предельных для соответствующего класса нагревостойкости.

**Заключение.** Разработана методика компьютерного расчета термомеханических процессов в элементах стержня обмотки статора мощного турбогенератора при наличии дефектов охлаждения, отличающаяся единым методологическим подходом к исследованию взаимосвязанных тепловых и термомеханических характеристик объекта для одной и той же степени дискретизации расчетной области. В основу методики положен численный метод конечных элементов, реализованный в виде пакета прикладных программ для ПЭВМ на языке ФОРТРАН.

Проведен сравнительный анализ величин, возникающих при нарушениях циркуляции охлаждающего агента термомеханических напряжений в изоляции стержня обмотки статора мощного ТГ. Установлено, что максимальные значения напряжений достигаются на участках обмотки вблизи выхода стержня из паза и местах креплений лобовых частей. При снижении расхода дистиллята величины термомеханических напряжений в локальных точках изоляции в радиальном направлении превышают предел прочности материала даже при максимальных температурах стержня ниже предельных значений для терморезистивной изоляции класса «В» (130 °С). Очевидно, что при расходах дистиллята, меньших по величине по сравнению с рассмотренными в работе, тепловое и термомеханическое состояния элементов стержня обмотки статора будут усугубляться с точки зрения ухудшения физических свойств изоляции и надежности работы ТГ.

Разработанная методика может применяться для расчета термомеханических процессов при возникновении иных дефектов охлаждения, с учетом внешних механических воздействий, в маневренных режимах пуска и сброса электрической нагрузки ТГ, для целей исследования эффективности регулирования охлаждения и др.

1. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Научные основы проектирования турбогенераторов. – Л.: Наука, 1986. – 184 с.
2. Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин. – Л.: Энергия, 1977. – 296 с.
3. 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.
4. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах: Возникновение и методы выявления дефектов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 256 с.
5. Поляков В.И. Диагностика технического состояния каналов водяного охлаждения и креплений стержней обмотки мощных турбогенераторов для продления срока их службы // Электрические станции. – 2001. – № 10. – С. 34 – 39.
6. Ремезов А.Н., Романов А.А., Косинов Ю.П., Бржезьянский С.Э. Проблемы технического перевооружения энергопредприятий РАО «ЕЭС России» и пути их решения // Электрические станции. – 2000. – № 1. – С. 3 – 5.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

8. Счастливый Г.Г., Меженный Ю.Я., Балабанов И.Г., Бронштейн Г.С., Волошин С.Г. Регулирование охлаждения генератора с полным водяным охлаждением / Препринт АН УССР. Институт электродинамики; № 390. – Киев, 1984. – 37 с.

УДК 621.313.322

## **ВПЛИВ ПОРУШЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЇ ДИСТИЛЯТУ НА ТЕРМОМЕХАНІЧНІ НАПРУЖЕННЯ В ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПОТУЖНІСТЮ 800 МВт**

**К.А.Кучинський**, канд.техн.наук

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

**e-mail: [kuchynskyy@mail.ru](mailto:kuchynskyy@mail.ru)**

*Розроблено методику комп'ютерного розрахунку термомеханічних напружень в ізоляції обмотки статора турбогенератора з повним водяним охолодженням. В основу методики покладено чисельний метод кінцевих елементів, реалізований у пакеті прикладних програм. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахункових досліджень термомеханічного стану ізоляції стержня обмотки статора турбогенератора потужністю 800 МВт у номінальному режимі з урахуванням зміни температурного стану його елементів при зниженні витрат води. Встановлено, при яких витратах води і на яких ділянках стержня величини термомеханічних напружень досягають небезпечних значень, які перевищують межу міцності матеріалу. Бібл. 8, рис. 3.*

**Ключові слова:** турбогенератор, витрати дистилляту, нагрівання, термомеханічні напруження, межа міцності матеріалу.

## **EFFECT ON CIRCULATION DISORDERS DISTILLATE ON THERMOMECHANICAL STRESSES IN ISOLATION OF THE STATOR WINDING OF THE TURBOGENERATOR BY POWER 800 MW**

**K.A. Kuchynskiy**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,**

**e-mail: [kuchynskyy@mail.ru](mailto:kuchynskyy@mail.ru)**

*The technique of computer calculation of thermomechanical stress in isolation of the turbogenerator stator winding with a full water cooling is developed. In a technique basis the numerical method of final elements realised in a package of applied programs is assumed. The comparative analysis of results of computational researches of a thermomechanical condition of isolation of the stator winding rod of the turbogenerator by power 800 MW in a nominal condition taking into account change of a temperature condition of its elements at water consumption decrease is carried out. It is founded, at what water consumption and on what sections of the rod of magnitude of thermomechanical stress attain the dangerous values exceeding an ultimate strength of the material. References 8, figures 3.*

**Key words:** the turbogenerator, the distillate charge, heating, thermomechanical stress, ultimate strength of the material.

1. Glebov I.A., Danilevich Ya.B. Scientific basis of designing of turbogenerators. – Leningrad: Nauka, 1986. – 184 p. (Rus)
2. Gurevich E.I. Thermal test and researches of electric machinery. – Leningrad: Energiia, 1977. – 296 p. (Rus)
3. Zavidai V.I., Krupenin N.V., Golubev A.V., Golovicher V.A. New aspects of thermal diagnosis of rotating electric machines // Energetik. – 2007. – № 6. – Pp. 48 – 49. (Rus)
4. Kulakovskii V.B. Operation of isolation in generators: Occurrence and defects detection methods. – Moskva: Energoizdat, 1981. – 256 p. (Rus)
5. Poliakov V.I. Diagnostics of the technical condition of a water cooling channels and fastenings of the winding rods of powerful turbogenerators for extension of their service // Elektricheskie stantsii. – 2001. – № 10. – Pp. 34 – 39. (Rus)
6. Remezov A.N., Romanov A.A., Kosinov Yu.P., Brzheznianskii S.E. Problems of modernizations of the power plants of the Russian Open Society «United Power Systems» and a way of their solution // Elektricheskie stantsii. – 2000. – № 1. – Pp. 3 – 5. (Rus)
7. Segerlind L. Application of a finite-elements method. – Moskva: Mir, 1979. – 392 p. (Rus)
8. Schastlivyi G.G., Mezhenyi Yu.Ya., Balabanov I.G., Bronshtein G.S., Voloshin S.G. Regulating of cooling of the generator with a full water cooling / Preprint Institut elektrodinamiki NAN Ukrainy, № 390. – Kiev, 1984. – 37 p. (Rus)

Надійшла 22.04.2013

Остаточний варіант 12.06.2013