

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТЕРЖНЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТИПА ТВВ-1000-2УЗ ПРИ СНИЖЕНИИ РАСХОДА ОХЛАДИТЕЛЯ

А. А. Ключников, К. А. Кучинский, Г. М. Федоренко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Анализируются виды повреждений и причины выхода из строя мощных турбогенераторов. Приведены результаты численных расчетных исследований распределения термомеханических напряжений в элементах верхнего стержня обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2УЗ в номинальном режиме при нормальном и сниженном расходе дистиллята. Показано, при каких расходах воды величины этих напряжений достигают опасных значений.

Ключевые слова: турбогенератор, охлаждение, термомеханические напряжения.

Атомные электростанции Украины оснащены турбогенераторами типа ТВВ с водородно-водяным охлаждением.

Достаточно известным является тот факт, что генератор имеет совершенную систему защиты по электрическим параметрам. Вместе с тем характер повреждений основных систем турбогенератора - обмотки статора, ротора, активной стали, бандажных колец, отклонения в работе систем охлаждения и щеточного аппарата - обусловлены термомеханическими процессами. С этой стороны действия существующих систем мониторинга технического состояния турбогенератора в работе, выводе его из работы и защиты оказываются явно неудовлетворительными [6].

Наиболее частыми причинами отказов в процессе эксплуатации турбогенератора серии ТВВ мощностью 1000 МВт двухполюсного исполнения на атомных электростанциях (АЭС) были следующие [3]:

возникновение течей водяного тракта обмотки статора;

возникновение трещин в сварных соединениях коллекторов водяного охлаждения обмотки статора;

нарушение целостности крепления лобовых частей обмотки, что связано с неблагоприятными вибродинамическими характеристиками узла «коллектор дистиллята – патрубки – внешние трубопроводы» конструкции лобовых частей, а также нарушением эксплуатационных режимов, в частности частыми сбросами и набросами нагрузки, превышающими нормы.

Опыт эксплуатации турбогенератора серии ТВВ-1000-2УЗ мощностью 1000 МВт, 24 кВ, $\cos \varphi = 0,9$, 3000 об/мин с водородно-водяным охлаждением на Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС выявили необходимость реконструкции узлов крепления водяных коллекторов и лобовых частей ОС генератора [9].

В случаях быстрого (до 5 лет наработки) отказа генераторов из-за раскрепления стержней в пазах сердечника [16] главной причиной повреждения изоляции и пазового крепления считается воздействие термомеханических напряжений, возникающих в обмотке статора, жестко связанной с сердечником, при многократных изменениях нагрузки. Важнейшим условием сохранения работоспособности крупных машин является обеспечение необходимой свободы аксиального перемещения обмотки относительно нажимной плиты для компенсации неравномерного теплового расширения сердечника и пазовой части обмотки. Выполнение этого условия решает также проблему ремонтпригодности обмотки [2].

Тематический диапазон исследований охватывает электромагнитную, теплогидравлическую и механическую проблематику, при этом вызывают все больший практический интерес "сопряженные" задачи, в которых процессы различной физической природы взаимообусловлены и требуют комплексного изучения. К важнейшим вопросам, подлежащим экспери-

ментальному исследованию в ближайшие годы, относится термомеханический аспект живучести генераторов большой мощности при их работе в маневренных режимах [5].

На АЭС Украины в последние годы все чаще происходят отказы турбогенератора двухполюсного исполнения типа ТВВ-1000-2УЗ, первопричиной которых становится появление и постепенное увеличение повышенных вибраций выводных шин обмотки статора, в результате чего имеют место механические повреждения и дальнейшие сопутствующие факторы, которые могут приводить к авариям [7, 8] (например, выход из строя и аварийное отключение ТГ-3 энергоблока № 3 Южно-Украинской АЭС 19 сентября 2006 г.).

Вследствие истирания изоляции в зоне лобовых частей обмотки (в основном со стороны возбуждителя) достаточно часто при эксплуатации генераторов ТВВ-1000-2УЗ происходит электрический пробой на землю. Из общего количества всех отказов относительный вклад данного вида повреждений ТВВ-1000-2УЗ на протяжении 2003–2006 гг. составил 45,5 % (по диаграмме Парето [7, 15]).

Анализ же диаграммы распределения общего недопроизводства электроэнергии в 2003–2006 гг. (3418,71 млн кВт·ч), вызванного по причине отказов турбогенератора типа ТВВ-1000-2УЗ в зависимости от всех указанных выше видов повреждений [15], показал, что наиболее значимыми с точки зрения восстановления технического состояния являются трещины в полых элементарных проводниках стержней обмотки статора (72,5 %).

Расследование аварий турбогенераторов ТВВ-1000-2УЗ, связанных с нарушением герметичности тракта охлаждения обмотки статора, выявило недостатки оперативных методов контроля и диагностики системы охлаждения обмотки.

Основной причиной низкой надежности работы генераторов ТВВ-1000-2УЗ на АЭС Украины является тот факт, что «эти генераторы, спроектированные и изготовленные в габаритах генераторов мощностью 800 МВт (таблица), не прошли в свое время обязательного для всех генераторов нового типа цикла доводки конструкции на электростанциях, который практикуется всеми фирмами мира» (протокол заседания НТС Минтопэнерго Украины от 26 июня 2006 г.). При этом напряжение обмотки статора осталось неизменным (24 кВ), ток статора увеличился на 25 %, а динамические усилия возросли в 1,56 раза. Мировой опыт изготовления турбогенератора такой мощности свидетельствует, что время на доводку их конструкции обычно занимает 7-8 лет. В результате конструкция машины оказалась «сырой» и ее доводка осуществляется параллельно с коммерческой эксплуатацией, хотя с момента пуска первой машины прошло уже более 20 лет.

Основные геометрические и электромагнитные параметры турбогенераторов ТВВ-800-2, ТВВ-1000-2 и ТВВ-1000-4

Параметр	ТВВ-800-2	ТВВ-1000-2	ТВВ-1000-4
Диаметр расточки статора, мм	1400	1400	1970
Диаметр бочки ротора, мм	1200	1200	1800
Длина бочки ротора, мм	7200	7200	7200
Линейная нагрузка статора, А/см	2045	2550	2296
Плотность тока статора, А/мм ²	8,36/9,65	11,2	9,34/10,07
Плотность тока ротора, А/мм ²	9,58	11,0	8,41
Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,965	0,984	0,976

Переход на изготовление и внедрение в практику атомной энергетики турбогенератора типа ТВВ-1000-2УЗ на базе ТВВ-800-2 обусловил существенное уменьшение «коэффициентов запаса» по целому ряду критических напряжений.

В работе анализируются результаты численных расчетных исследований термомеханических напряжений на основе данных о параметрах температурных режимов работы турбогенератора при номинальном и уменьшенном расходе дистиллята в стержне обмотки статора.

Методика исследований построена на основе численного математического моделирования задачи термомеханики методом конечных элементов (МКЭ) в двумерной постановке. В общем случае теория упругости МКЭ для решения задач механики деформируемого твердого тела достаточно подробно рассматривается в [13] и применительно к исследованию термомеханических процессов в элементах статора мощного турбогенератора изложена в [12].

МКЭ характеризуется значительной гибкостью в построении дискретной модели расчетной области и простотой задания граничных условий. Преимуществом такого подхода является также возможность получения термомеханических нагрузок не только средних по объему, а и максимальных величин в локальных точках области исследований и определить их местоположение в элементах стержня.

По МКЭ отыскание поля перемещений связано с минимизацией потенциальной энергии упругого тела. После определения узловых значений вектора перемещений вычисляются компоненты деформаций и напряжений в элементах с учетом соответствующих начальных и граничных условий.

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

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

$$\{f\} = - \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} dV - \int_V [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV - \int_S [N]^T \begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} dS - \{P\}, \quad (2)$$

где $[B]$ - матрица градиентов, связывающая деформации и перемещения; $[D]$ - матрица упругих констант, описывающая механические свойства; $\{\epsilon_0\}$ - 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 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 α и Пуассона μ , а также отклонением температуры от некоторого равновесного значения ΔT .

Матрица упругих характеристик, описывающая механические свойства, в случае плоского напряженного состояния записывается как

$$[D] = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В результате матрица жесткости элемента (левая часть системы уравнений) записывается как

$$[k] = [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot t \cdot S. \quad (4)$$

Начальная деформация элемента, связанная с тепловым расширением,

$$\{\epsilon_0\} = \alpha \cdot \Delta T \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

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

$$\{f\} = [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \cdot t \cdot S = \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \begin{Bmatrix} b_i \\ c_i \\ b_j \\ c_j \\ b_m \\ c_m \end{Bmatrix} \cdot \quad (6)$$

Полная система уравнений для элемента записывается как

$$[k] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} = \{f\} \cdot \quad (7)$$

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

После определения перемещений в узлах компоненты деформации в элементе рассчитываются следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = [B] \cdot \begin{Bmatrix} U_{2i-1} \\ U_{2i} \\ U_{2j-1} \\ U_{2j} \\ U_{2m-1} \\ U_{2m} \end{Bmatrix} \cdot \quad (8)$$

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

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \quad (9)$$

либо через узловые перемещения

$$\{\sigma\} = [D] \cdot [B] \cdot \{U\} - [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \cdot \quad (10)$$

Теоретические положения реализованы в виде пакета прикладных программ для ПЭВМ на языке ФОРТРАН.

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.

Задача термомеханики решается для конструкции из двух сопряженных частей генератора, обладающих различными коэффициентами линейного расширения (система "стержни статора - железо статора"). Расчетной областью является наиболее нагретая половина верхнего стержня (пазовая и лобовая части) обмотки статора генератора мощностью 1000 МВт. На основе результатов расчета температурного поля и термомеханических свойств используемых материалов рассчитываются перемещения, деформации и напряжения в узлах указанной зоны.

Фрагмент дискретизации стержня в пазовой части отображает рис. 1. Верхний и нижний слои модели соответствуют изоляции, внутренние слои - чередующимся по высоте стержня элементарным сплошным и полым проводникам. При этом число конечных элементов сетки составляло 1980, узлов - 1092 (т.е. решалась система из 2184 уравнений, поскольку в каждом расчетном узле определялись по две векторные величины - компоненты перемещений по осям x и y декартовой системы координат), ширина ленты матрицы коэффициентов после ее оптимизации равна 28.

Входными данными для расчета термомеханических характеристик в номинальном режиме и при снижении расхода воды в стержне являлись установившиеся распределения уровней нагревов основных узлов сердечника статора в радиальном и аксиальном направлениях по длине статора и высоте стержня от середины генератора до концевых зон со стороны турбины.

В силу конструктивных особенностей принималось, что перемещения на левой вертикальной границе (см. рис. 1) (оси симметрии модели - середине стержня в активной зоне паза статора) по оси x отсутствуют. На дне паза и на границе между стержнями обмотки статора (верхняя и нижняя горизонтальные линии на рис. 1) перемещения всех узлов модели по оси y также равны нулю. Здесь возможны перемещения только вдоль оси x .

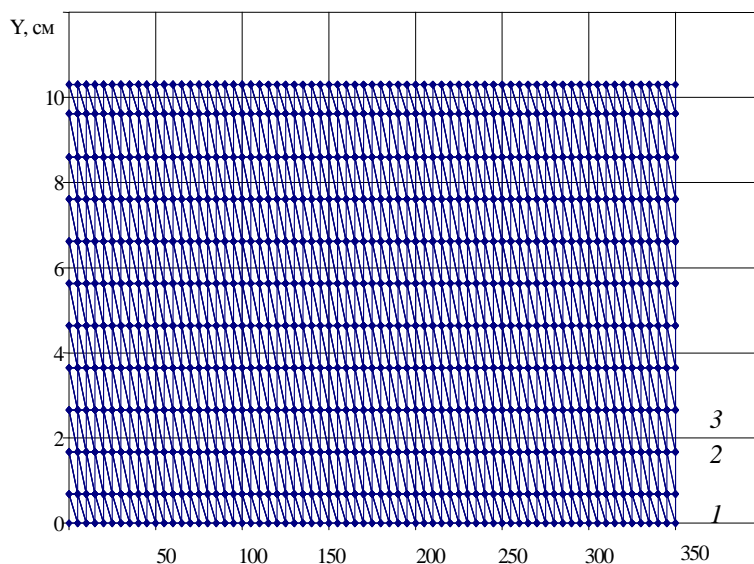


Рис. 1. Фрагмент дискретизации половины верхнего стержня обмотки статора ТВВ-1000-2У3 в пазовой части: 1 – изоляция стержня; 2 – сплошные проводники; 3 – полый проводник.

Предварительно проводился численный термомеханический расчет половины сердечника статора (от середины до торцевой зоны со стороны турбины) в аксиальном сечении на основе данных о его нагреве в номинальном режиме по результатам работы [14]. Полученные величины составляющих перемещений узлов статора по оси y задавались как граничные условия I рода в узлы модели стержня, в которых "осуществлялось" крепление лобовых частей бандажами.

Номинальный режим в данном случае рассматривается как базовый, поскольку именно для него изначально определяются потери, нагревы элементов статора и расходы воды, водорода в системе охлаждения. В дальнейшем от параметров данного режима величины тепловых нагрузок элементов стержня пересчитываются в отличных от номинального расхода воды режимах пропорционально в соответствии с уменьшением уровней расхода дистиллята и условий охлаждения во всех узлах по длине машины и задаются как правая часть системы уравнений в задаче термомеханики. Уменьшение расхода принято равномерным по всем охлаждающим каналам.

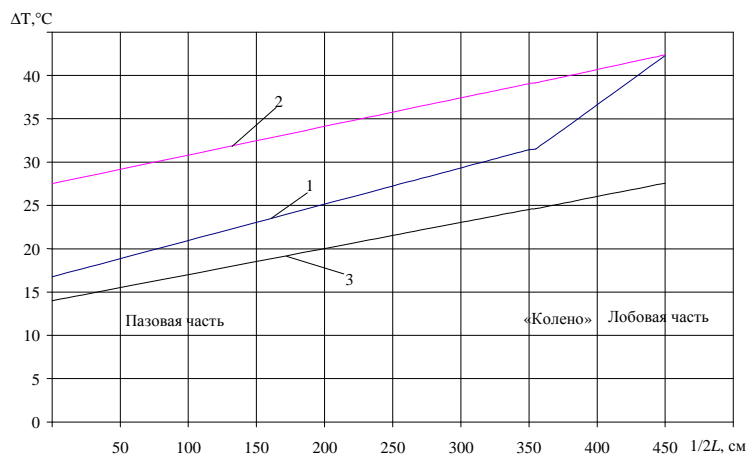


Рис. 2. Изменения превышений температур в элементах верхнего стержня обмотки статора ТВВ-1000-2У3 от середины активной зоны сердечника к торцевой части со стороны турбины при номинальном расходе дистиллята.

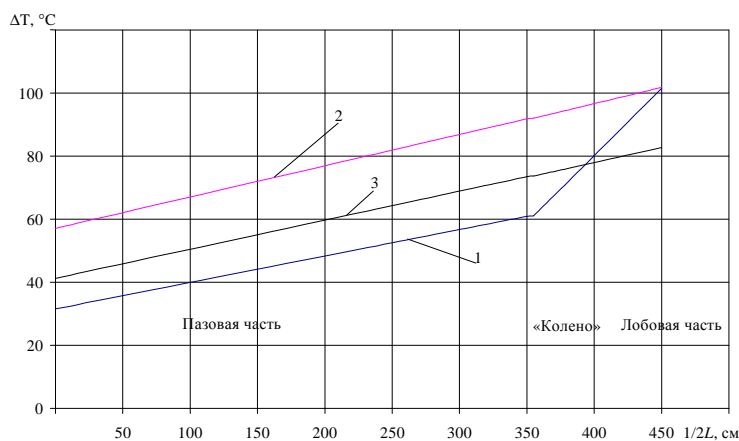


Рис. 3. Изменения превышений температур в элементах верхнего стержня обмотки статора ТВВ-1000-2У3 от середины активной зоны сердечника к торцевой части со стороны турбины при 1/2 расхода дистиллята.

Температуры хладагентов на входе (холодного дистиллята и водорода) принимались равными 35 °С. Величины нагревов сплошных и полых проводников стержня в номинальном режиме задавались на основе данных работы [14].

Закон изменения подогрева дистиллята по длине машины предполагался линейным.

Температура изоляции в пазовой части стержня (активной зоне турбогенератора) в каждом расчетном узле принималась равной средним значениям между уровнями нагревов стали и меди в данном радиальном (поперечном) сечении модели. Нагрев в зоне лобовых частей приближался к нагреву меди стержня [10] на выходе со стороны турбины, где подогрев дистиллята в полых элементарных проводниках достигает своего максимума.

На рис. 2 - 4 показаны изменения превышений температур в характерных элементах половины верхнего стержня обмотки статора в аксиальном направлении в зависимости от расхода дистиллята – номинального, половинного и расходе воды, составляющем 1/3 от номинального. (В дальнейшем все результаты приводятся для слоя изоляции стержня, сплошного и полого элементарных проводников – соответственно кривые 1, 2, 3 или первые три слоя модели).

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

На рис. 5 - 7 показано изменение термомеханических напряжений в аксиальном направлении вдоль указанных слоев модели 1 - 3 по оси x ; рис. 8 - 10 отражают характер изменения и величины термомеханических напряжений в конечных элементах для тех же слоев по оси y в пазовой и лобовой частях стержня для соответствующих тепловых режимов.

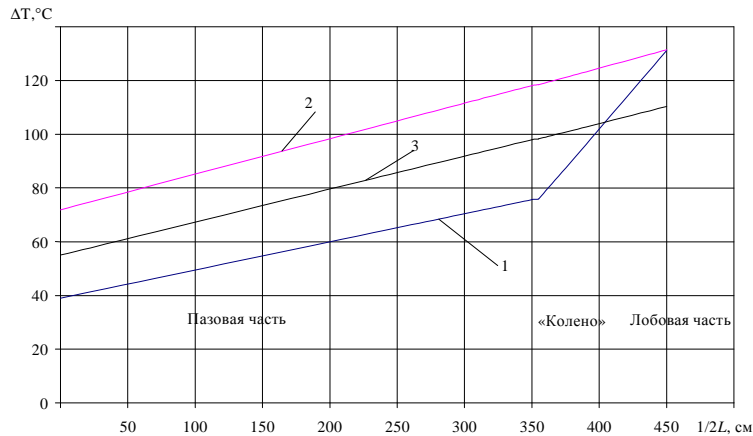


Рис. 4. Изменения превышений температур в элементах верхнего стержня обмотки статора ТВВ-1000-2У3 от середины активной зоны сердечника к торцевой части со стороны турбины при $1/3$ расхода дистиллята.

Входные данные для термомеханического расчета двух последних режимов показывают, что температура дистиллята на выходе из верхнего стержня обмотки статора достигает точки кипения воды. Теплообмен в каналах полых проводников стержней обмотки при таких условиях значительно усложняется. Поэтому принятые температуры проводников необходимо рассматривать как минимальные из возможных (равно как и полученные уровни термомеханических напряжений в элементах стержня), поскольку в таких режимах коэффициент теплоотдачи от элементарных проводников может снижаться в несколько раз [11]. Это ведет к ускоренному тепловому старению изоляции и повышению вибраций.

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 нагрева стали зубца, меди стержня и его изоляции. В пазовой зоне величины напряжений монотонно увеличиваются от средней части сердечника статора к его торцу, что связано с подогревом хладагента по длине стержня. 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.

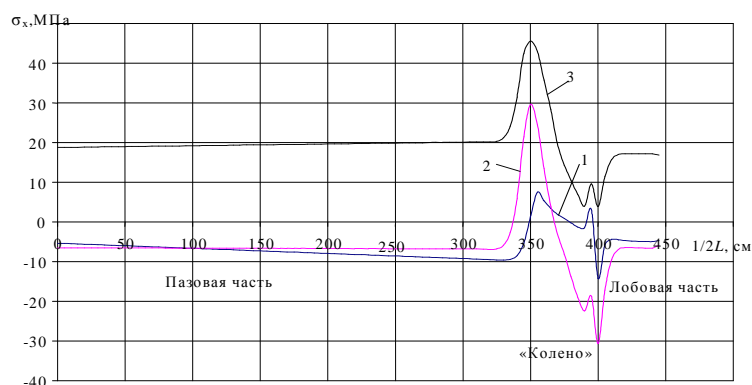


Рис. 5. Термомеханические напряжения по оси x в элементах на половине длины стержня при номинальном расходе дистиллята.

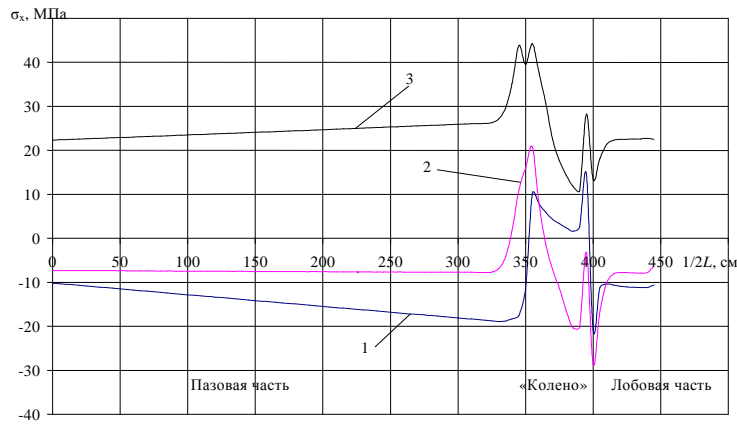


Рис. 6. Термомеханические напряжения по оси x в элементах на половине длины стержня при $1/2$ расхода дистиллята.

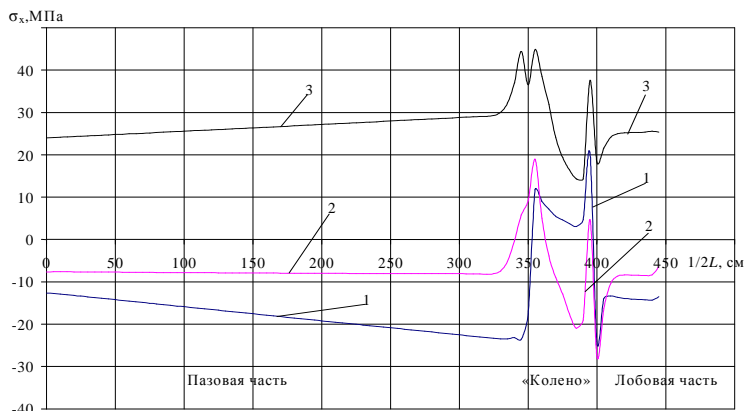


Рис. 7. Термомеханические напряжения по оси x в элементах на половине длины стержня при $1/3$ расхода дистиллята.

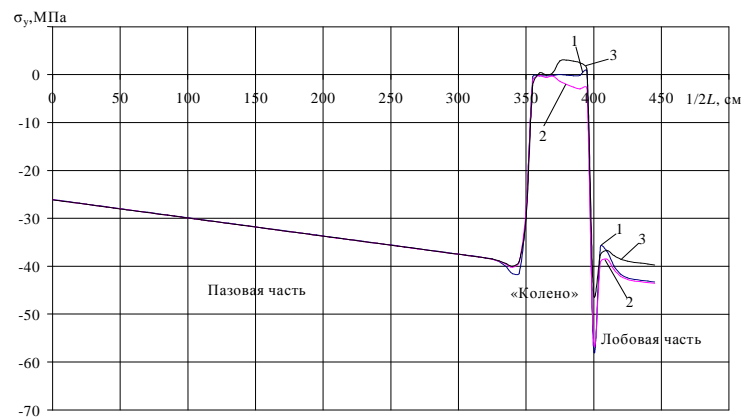


Рис. 8. Термомеханические напряжения по оси y в элементах на половине длины стержня при номинальном расходе дистиллята.

Для рассматриваемой математической модели при соответствующих граничных условиях компоненты напряжений в элементах изоляции вдоль длины стержня по осям x и y при номинальном расходе охлаждающего агента не превышают допустимых по пределу прочности материала, при $1/2$ от номинального расхода близки к предельной величине (80 – 90 МПа) [1]), а при $1/3$ от номинального расхода значительно превышают ее по оси y (около 150 МПа).

«Пики» на выходе из паза и в месте начала креплений в лобовой части обусловлены резким изменением граничных условий (переход от «закрепленного» состояния к «свободному») в этих «особых точках» и чисто методическими свойствами (уровнем триангуляции расчетной области) приближенного конечно-элементного подхода к решению задачи.

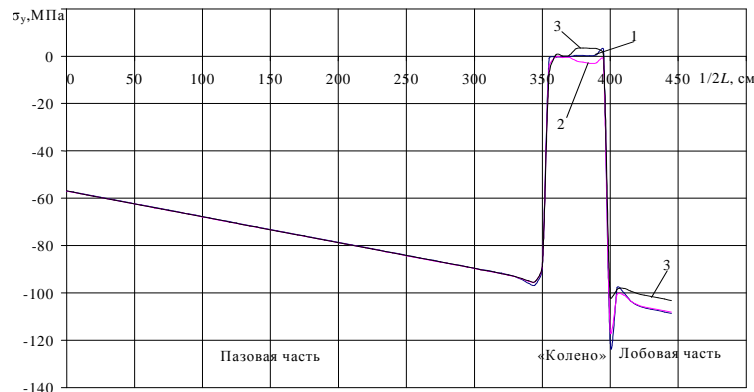


Рис. 9. Термомеханические напряжения по оси u в элементах на половине длины стержня при 1/2 расхода дистиллята.

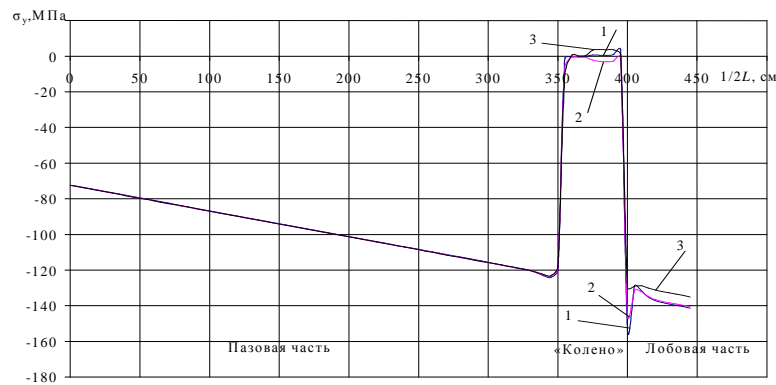


Рис.10. Термомеханические напряжения по оси u в элементах на половине длины стержня при 1/3 расхода дистиллята.

Как и следовало ожидать, в «свободной» зоне деформированного стержня (на его «колене») напряжения по оси u 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).

Таким образом, значения термомеханических напряжений в изоляции стержня в аксиальном направлении значительно меньше предела ее прочности, а в радиальном при снижении расхода дистиллята близки к величине разрывной прочности, причем как в пазовой, так и в лобовой частях обмотки со стороны турбины и особенно в местах выхода стержня из паза. Особую опасность представляют термомеханические напряжения в узлах, расположенных в начале «свободной» зоны на выходе из паза.

Для предотвращения перегрева стержней обмотки и возникновения опасных термомеханических напряжений в них систему термоконтроля необходимо существенно усовершенствовать путем непосредственного измерения расхода воды, проходящего через каждый стержень, и температуры «горячего» дистиллята на выходе из стержней обмотки. Для рассмотренного турбогенератора при перегреве дистиллята в стержне обмотки в номинальном режиме свыше 80 °С токовая нагрузка должна быть снижена до величины, при которой перегрев дистиллята уменьшится до номинального значения.

В России были проведены диагностические испытания, основанные на сборе и обработке информации применительно к различным системам теплового контроля (температурные датчики на поверхности обмотки статора или на сливе дистиллята из отдельных стержней), на турбогенераторе мощностью от 165 до 1200 МВт на ряде тепловых и атомных электростанций (Новополоцкая ТЭЦ; ТЭЦ-22 и ГРЭС-19 Ленэнерго; Лукомльская, Славянская и Костромская ГРЭС; Игналинская, Нововоронежская и Балаковская АЭС) [4].

Ремонтно-восстановительные и реконструкционные работы для генератора типа ТВВ-1000-2У3 также были выполнены и на энергоблоке № 3 Калининской АЭС, в частности на статоре в следующем объеме [9]:

крепление статорной обмотки в лобовых частях с помощью массивных стеклотекстолитовых колец конической формы, эпоксидной замазки, тяг и пружин;

контроль теплового состояния обмотки статора с помощью термодатчиков, измеряющих температуру дистиллята, сливающегося из каждого стержня;

установка датчиков для обеспечения дополнительного контроля нагрева и вибрации торцевых частей сердечника статора, нажимных колец и лобовых частей обмотки статора;

разработка схемы системы водородного охлаждения с дополнением схемы ускоренного выброса водорода из генератора в аварийных ситуациях;

дополнительный контроль над появлением водорода в системе охлаждения обмотки статора генератора и в газоохладителях.

Проект «малой модернизации» предусматривает также предотвращение ослабления крепления лобовых частей обмотки статора на выходе из паза с переносом термосопротивлений с нижних стержней на арматуру сливных шлангов в месте их соединения со сливным коллектором.

Проведение указанных конструктивных мероприятий подтверждает достоверность и научную обоснованность выводов, вытекающих из результатов расчетно-теоретических исследований данной работы.

Отметим, что разработанная методика достаточно универсальна и может быть применена для исследования процессов в других конструктивных элементах машины и режимах, которые отличаются от рассмотренных выше (асинхронных, несимметричных, пусковых, при повышенной нагрузке, работе с потреблением реактивной мощности и т.д.). Необходимо только, чтобы перед обращением к программе была сформирована расчетная область (сетка конечных элементов), сформулированы начальные и граничные условия для соответствующего режима и конструкции, заданы величины нагрузок как правые части системы уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ваксер Б.Д., Житомирский А.А., Поляков Р.С., Преснов Ю.Л.* Термоциклические испытания статорной изоляции // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. сем. "Вопросы старения статорной изоляции крупных электрических машин и способы ее профилактического обслуживания". (г. Счастье, Ворошиловградская ГРЭС, 11 - 14 сент. 1979 г.). - М.: Союзтехэнерго, 1979. - С. 85 - 89.
2. *Ваксер Б.Д., Кийло О.Л., Перминов В.Л. и др.* Исследование конструкции изоляции обмотки статора мощных турбогенераторов, изготавливаемой способом полной вакуум-нагнетательной пропитки // Сб. "Электросила". - СПб: Электросила, 2004. - № 43. - С. 65 - 71.
3. *Горбатина Л.П., Жуков Д.В., Кади-Оглы И.А. и др.* Двухполюсные и четырехполюсные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для АЭС. Описание конструкции, опыт эксплуатации и пути совершенствования // Приложение к сб. «Электросила» № 42. - СПб: Электросила, 2003. - С. 16 - 21.
4. *Гуревич Э.И.* Диагностические испытания турбогенераторов на тепловых и атомных электростанциях: Тез. докл. конф. «Электросервис-2003» // Сб. «Электросила» № 43. - СПб: Электросила, 2004. - С. 187 - 188.

5. *Гуревич Э.И.* Натурные исследования генераторов для энергетики: Тез. докл. конф. «Электроэнерго-2002» // Приложение к сб. «Электросила» № 42. - СПб: Электросила, 2003. - С. 154 – 155.
6. *Завидей В.И., Крупенин Н.В., Голубев А.В. и др.* О поддержании эксплуатационной надежности турбогенераторов // Энергетик. - М., НТФ «Энергопрогресс», 2008. - № 2. - С. 44 - 45.
7. *Звіт про науково-дослідну роботу «Збір та аналіз оперативної інформації щодо ушкодженості на протязі всього життєвого циклу турбогенераторів типу ТВВ-1000-2У3 АЕС України (побудова діаграми Парето для кожного турбогенератора)».* (Заключний). № ДР 0107U010345. – Чорнобиль, 2007.
8. *Звіт про науково-дослідну роботу «Підвищення надійності та навантажувальної здатності турбогенераторів потужністю 1000 МВт двополюсного виконання (аналіз, висновки, рекомендації, консалтингові послуги)».* (Заключний). - № ДР 0108U004523. – К., 2008.
9. *Йогансен В.И., Трофимов А.М.* Модернизация турбогенератора ТВВ-1000-2У-3 Калининской АЭС // Сб. «Электросила». - СПб: Электросила, 2003. - № 42. - С. 92 – 94.
10. *Карпенко В.Н., Политучий А.И.* Моделирование процесса многоступенчатого нагрева электрических машин // Техн. электродинамика. - 2002. - Тем. вып. - Ч. 5. - С. 35 - 38.
11. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 216 с.
12. *Кучинский К.А.* Механические напряжения в элементах статора турбогенератора при работе с переменной тепловой нагрузкой // Техн. электродинамика. - 2003. - № 4. - С. 46 - 49.
13. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979. - 392 с.
14. *Численный анализ теплового состояния обмотки статора турбогенератора мощностью 1000 МВт для контроля и диагностики / Г. Г. Счастливый, Г. М. Федоренко, В. И. Выговский, А. В. Выговский.* - Киев, 1998. - 24 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т электродинамики; № 812).
15. *Шидловський А.К., Тутко О.І., Федоренко Г.М. та ін.* Електродинамічна стійкість з'єднувальних та вивідних шин обмотки статора та методи підвищення надійності турбогенераторів потужністю 1000 МВт // Енергетика та електрифікація. - 2008. - № 9. - С. 22 - 27.
16. *Griffith G., Tucker S., Milsom J., Stone G.* Problems with Modern air-cooled Generation Stator Winding Insulation, Rep. 0883-7554, El. Ins. Mag., 2000.

ТЕРМОМЕХАНИЧНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ СТЕРЖНЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ТИПУ ТВВ-1000-2У3 ПРИ ЗНИЖЕННІ ВИТРАТИ ОХОЛОДЖУВАЧА

О. О. Ключников, К. А. Кучинський, Г. М. Федоренко

Аналізуються види ушкоджень і причини виходу з ладу потужних турбогенераторів. Наведено результати чисельних розрахункових досліджень розподілу термомеханічних напруг в елементах верхнього стержня обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000-2В3 в номінальному режимі при нормальній і зниженій витраті дистилляту. Показано, при яких витратах води величини цих напруг досягають небезпечних значень.

Ключові слова: турбогенератор, охолодження, термомеханічні напруги.

THERMOMECHANICAL CONDITION OF ELEMENTS OF THE CORE OF WINDING STATOR OF THE TURBOGENERATOR SUCH AS TBB-1000-2U3 AT DECREASE IN THE CHARGE OF THE COOLER

O. O. Kljuchnikov, K. A. Kuchinsky, G. M. Fedorenko

Kinds of damages and the reasons of failure of powerful turbogenerators are analyzed. Results of numerical settlement researches of distribution of thermomechanical stress in elements of the top core of a winding stator turbogenerator TBB-1000-2U3 in a nominal mode are resulted at the normal and reduced charge of distillate. It is shown, at what charges of water of size of that stress reach dangerous values.

Keywords: a turbogenerator, cooling, thermomechanical stress.

Поступила в редакцию 08.07.09