

А.И. КУМЕНКО, А.В. ТИМИН (ООО «НПЦ «Динамика», г. Москва, Россия)

УТОЧНЕННЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСА БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ РОТОРОВ В ПРОЦЕССЕ МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА*

При эксплуатации турбоагрегатов возникают тепломеханические процессы, которые снижают ресурс деталей и узлов валопровода, что повышает риск возникновения аварий и катастроф. В энергетике России и за рубежом неоднократно происходили аварии, связанные с разрушением соединения ротора генератора и ротора возбuditеля [1], в том числе дважды в 2013–2014 гг. произошли разрушения (частичное и полное) болтов полумуфта якоря возбuditеля на т/а 1000 МВт. В 2014–2015 гг. на ряде турбин 250 МВт разрушались вскоре после сборки болты, соединяющие ротора высокого и среднего давления. Следует отметить, что одни и те же детали могут проработать в близких условиях 5–10 лет и более, другие разрушаются через несколько месяцев. Это же относится и к болтам полумуфт. Такой большой разброс по фактическому пределу усталости и ресурсу связан с двумя важными факторами: а) разброс свойств материалов может дать 100%-ный разброс ресурсных характеристик; б) разброс технологических отклонений из-за человеческого фактора при сборке может уменьшить ресурс на порядок и более.

Так, основные причины поломки болтов полумуфта генератора и якоря возбuditеля на т/а 1000 МВт в декабре 2012 г. после нескольких лет эксплуатации и в январе 2013 г. после месяца эксплуатации были установлены следующие:

1) человеческий фактор привел к отступлению от требований технологического процесса сборки призонных штифтов полумуфт (вместо плотной посадки болты были установлены с зазором 0,1–0,2 мм и более. 2);

2) наряду с этим всегда имеют место процессы деформаций фундамента и тепловых расширений статорных элементов, приводящие к изменению взаимного положения опор (ВПО) и, соответственно, изменению нагруженности шеек роторов и статических нагрузок в опорах. Теоретически безмоментные сечения между полумуфтами по факту должны быть с минимальными моментами и минимальными переменными напряжениями в болтах, так как сами болты затягиваются до половины предела текучести. В результате болты оказываются под действием не только растягивающих, но также дополнительных изгибающих моментов и поперечных сил. Это происходит как при переходе турбоагрегата из холодного в горячее состояние, так и в процессе сезонных деформаций грунта. Деформации грунта возникают под воздействием меняющегося уровня грунтовых вод и воздействия вибрационных возмущений, в некоторых районах еще и под сейсмическим воздействием, что очень сложно предугадать при сборке;

* Работа выполняется при финансовой поддержке РНФ в соответствии с соглашением № 15-19-00267 от 19 мая 2015 г.

3) на смежных опорах, при существенной разнице диаметров и нагрузок на шейки роторов, имеем разные величины всплытия цапф роторов, что также приводит к нарушению нагрузок в опорах от собственного веса. Напряжения от 2 и 3 факторов связаны с весом роторов и расцентровками опор, при этом необходимо учесть еще другие технологические факторы;

4) предел текучести стали 38Х2Н2МА-3, из которой сделаны болты, $\sigma_{0,2} = 785$ МПа. Исходные номинальные растягивающие статические напряжения после сборки полумуфт составляют 350–400 МПа без учета концентрации напряжений. Теоретические коэффициенты концентрации в резьбе [2, 3, 19]

$$K_T^H = 1 + 1,57 (s/r)^{1/2};$$

в ненагруженной (свободной)

$$K_T^C = 1 + 1,75 (s/r)^{1/2};$$

где s – шаг резьбы; r – радиус скругления во впадине;

для головки болта

$$K_T^{ГБ} = 1 + 1,1 (d/R)^{1/2};$$

где d – диаметр болта, R – радиус галтели.

При реальных значениях перечисленных параметров теоретические коэффициенты концентрации в резьбе составляют порядка 3,0–3,5, а в зоне головки болта 5,0–5,5. Таким образом, в процессе затяжки в галтелях резьб и головок болтов образуются зоны пластической деформации. Факт наличия пластической деформации не позволяет проводить расчёт перемножением теоретического коэффициента концентрации на средние напряжения в сечении, даже если в первом приближении полагать, что коэффициенты концентрации не зависят от частоты, с которой меняются напряжения. Речь идёт о частотах до 300–500 Гц, как правило, кратных обратной частоте.

Расчет фактического напряженного состояния с учётом пластических деформаций существенно усложняется. И это ещё один фактор, определяющий ресурс при неизвестном технологическом разбросе напряжений после сборки;

5) растягивающие напряжения в болтах также имеют разброс, так как даже при так называемой «моментной» затяжке отклонения в усилиях могут составлять до 10 % и более. Эти различия приводят к разбросу коэффициентов асимметрии циклов для разных болтов. Другим фактором, влияющим на различие напряжений в болтах является различное опирание головок болтов по поясам в теле фланца. Это различие возникает, в свою очередь, как из-за неточности и неперпендикулярности площадок опирания, так и из-за разной податливости тела фланца по окружности болта. Выполняя расчеты фланцевых соединений с использованием современных программных комплексов, эти факторы можно определить количественно, если есть статистика геометрических отклонений болтов.

Для полной оценки усталостной прочности к сказанному следует добавить еще ряд факторов:

- дополнительные напряжения после затяжки болтов полуфланцев из-за действия осевых сил на роторы турбины. Они меняются от режима к режиму;
- касательные напряжения от момента затяжки на ключе;

- напряжения от переменного крутящего момента, который также зависит от режима нагрузки на турбине;

- изменение напряжений из-за действия центробежных сил при наборе частоты вращения или забросе оборотов в переходных режимах;

б) анализ жесткости сечений в зоне болтовых соединений роторов валопровода показывает, что она может отличаться для разных фланцевых соединений валопровода в несколько раз. И этот конструктивный фактор, при прочих равных условиях существенно влияет на ресурс болтовых соединений. Так, расчеты показывают, что изгибная жесткость фланцевого соединения между ротором генератора и якорем возбuditеля т/а 1000 МВт почти в 7,6 раз меньше, чем изгибная жесткость остальных муфтовых соединений валопровода (табл. 1). А при нарушении призонности болтов она падает еще в 2 раза. Следовательно, при прочих равных условиях переменные растягивающие напряжения в болтах от изгиба в этом соединении могут быть на порядок выше.

7) наконец, еще одна важная группа дефектов вызывает вибрации валопровода и, соответственно, переменные напряжения в болтах полумуфт. Эта группа может внести свой вклад в напряженное состояние болтовых соединений. Это переменные напряжения от:

- моментов в сечениях вала от остаточного дисбаланса, остаточного значения «коленчатости», остаточного значения угловой несоосности при сборке полумуфт;
- неравножесткости сечений роторов турбины, генератора, якоря возбuditеля;
- переменные напряжения от пульсаций давления;
- при проходе резонансных зон при разгоне и останове турбины;
- от не отстроенных на рабочей частоте вращения резонансных участков статора, опор, фундамента;
- из-за дефектов типа «теплого прогиба» роторов турбины, генератора, возбuditеля;
- от всплеск низкочастотной вибрации с большими перемещениями роторов по первой парциальной форме колебаний;
- от дефектов, связанных с короблением статора и отрывом статора от площадок прилегания и др.

Таблица 1

Напряжения в зависимости от параметров полумуфт при одинаковом изгибающем моменте

Муфта	РВД-РСД	РСД-РНД-1	РНД-1 – РНД-2	РНД-2 – РНД-3	РНД-3 – проставка	Проставка-РГ	РГ-ЯВ
Момент	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Число болтов	21	21	21	21	21	18	24 (12)
Диаметр болтов	90–95	90–95	90–95	90–95	90–95	90–95	40
Радиус установки болтов, м	0,580	0,580	0,580	0,580	0,580	0,580	0,374
Уровень напряжений	σ_0	σ_0	σ_0	σ_0	σ_0	1,17 σ_0	7,65 σ_0 (15,3 σ_0)*

* В скобках указано увеличение напряжений при нарушении «призонности» штифтов – при зазоре ~ 0,1 мм.

Всего можно насчитать более четырех десятков первичных дефектов, вызывающих вибрации. Вероятность некоторых из них мала, но они автоматически учитываются при мониторинге.

Следует отделять мониторинг напряжений от медленных тепловых процессов и быстрых вибрационных с частотой вращения. Анализ показывает, что статический изгиб вращающегося валопровода всегда дает частоту переменных напряжений, равную частоте вращения. Колебания с частотой вращения могут давать разные эффекты [4]. В идеальном случае при прямой синхронной прецессии муфтового пролета имеем статические напряжения изгиба. То есть вал вращается изогнутым по какой-то форме колебаний. При эллиптической траектории можно выделить часть, связанную с прямой синхронной прецессией, и часть, связанную с изгибными колебаниями относительно изогнутого вала. Первая часть будет относиться к статическим напряжениям растяжения болтов и вызовет их неравномерную затяжку по окружности, а вторая часть будет давать циклические напряжения, влияющие на накопление усталостных повреждений. В общем случае, переменная часть напряжений будет иметь свой спектр и свой характер изменения во времени.

Для оценки ресурса и запасов прочности надо знать поврежденность от каждого из основных силовых факторов. Для этих целей применяется широко известный метод суммирования напряжений [2].

Поскольку предел усталости материала болтов σ_{-1} получен на малых образцах, чтобы учесть реальные размеры детали, необходимо внести поправки на асимметрию цикла, частоту нагружения и масштабный фактор [5, 6]. Предел выносливости детали определим с поправками:

$$\sigma_{Rd} = k_R k_f \varepsilon_d \sigma_{-1},$$

где k_R , k_f , ε_d – коэффициенты, соответственно учитывающие асимметрию цикла, частоту нагружения и влияние размеров детали; σ_{-1} – предел выносливости гладкого образца при симметричном цикле. Коэффициент асимметрии может быть рассчитан по зависимости, приведенной в работе [7]. Для учета масштабного фактора применим зависимость [8]

$$\varepsilon_d = 0.5 \{1 + [L/(88,3G)]^{-0,11}\},$$

где L – характерный линейный размер; G – относительный градиент первого главного напряжения на поверхности концентратора.

Расчет поврежденности ψ проводится по методике суммирования повреждений по аналогии с [2, 6].

Мерой частичного исчерпания ресурса $\Delta\psi$ детали, работающей в условиях малоциклового усталости с разными i -ми уровнями нагружения с заданным размахом деформаций $\Delta\varepsilon_i$ и соответствующими расчетными циклами до разрушения N_{r_i} является сумма по i

$$\Delta\psi_1 = \sum \Delta N_i / N_{r_i},$$

где ΔN_i – число медленных циклов нагружения с деформацией $\Delta\varepsilon_i$.

Для многоциклового усталости с разными уровнями нагружения σ_{ai} на разных i -х режимах длительностью ΔN_i поврежденность оценим так

$$\Delta\psi_2 = \sum \Delta N y_i / N_{ур_i},$$

где $N_{ур_i}$ – расчетное число циклов до разрушения при многоциклового усталости.

Условие работоспособности по критерию не появления трещин усталости определяется неравенством

$$\sum \Delta\psi \leq \psi_{пр},$$

где $\psi_{пр}$ – предельная поврежденность, характеризующая способность материала сопротивляться циклическим нагрузкам.

Она определяется экспериментально при испытаниях образцов в условиях усталости и может быть выражена зависимостью

$$\psi_{пр} = N_{рэ} / \bar{N}_{рэ},$$

где $N_{рэ}$ – экспериментальное число циклов до разрушения; $\bar{N}_{рэ}$ – среднее экспериментальное число циклов до разрушения, определяемое по кривой регрессии в зависимости от параметров нагружения, например, для размаха полных деформаций $\Delta\epsilon$ для малоциклового усталости или амплитуды напряжений σ_a при испытаниях на многоциклового усталость.

Примечание: Уравнение усталостной кривой для обычной многоциклового усталости применяется в виде [2]:

$$\bar{N}_{рэ} = N_0 (\sigma_{-1} / \sigma)^m,$$

где σ_{-1} – предел выносливости; N_0 – точка перегиба усталостной кривой; m – показатель наклона кривой усталости.

Значения $N_{рэ}$ являются случайными величинами, подчиняющиеся логарифмически нормальному закону распределения, в силу чего и параметр $\psi_{пр}$ является случайной величиной, подверженной так же случайному логарифмически нормальному закону распределения.

Учет всех перечисленных факторов, вызывающих переменные напряжения в эксплуатации, производится автоматически от момента работы на валоповороте и заканчивая останом. Автоматический учет происходит, если постоянно с заданным шагом по времени измеряются мгновенные статические и динамические перемещения ротора и соответственно переменные напряжения независимо от источника их происхождения [9, 10]. Таким образом, оценка рисков остановов и аварий из-за наличия любых дефектов существенно уточняется, если мы измеряем уровень динамических напряжений в конструкции, который в совокупности со статическими напряжениями дает возможность выполнить корректные оценки ресурса тех элементов, для которых эти напряжения определены. Корректность методик определяется наличием полноты информации по всем перечисленным технологическим отклонениям в конструкции. В отличие от стадии конструкторского расчета вероятности разрушений и оценки ресурса, главные параметры – номинальные статические и динамические напряжения здесь вычисляются непрерывно. Но если для болтовых соединений температура металла не так высока, то для средней части роторов высокого и среднего давления нужно учесть возможный разброс температур при пуске и эксплуатации [5, 6]. К сожалению, вопросы взаимодействия ползучести, мало- и многоциклового усталости совместно с вибрацией до сих пор никем подробно не рассматривались. Первые попытки поставить эту задачу были сделаны автором в [6]. Для решения этой важной для отрасли задачи и для обеспечения мониторинга напряжений и ресурса высокотемпературных частей роторов паровых и газовых турбин желательны дополнительные

к ранее проводившимся эксперименты по определению кривых усталости высокотемпературных образцов при разных уровнях и частотах воздействия.

Однако системы мониторинга не могут в одночасье понизить напряжения в конструкции, исключить опасные режимы, устранить случайные природные воздействия, приводящие к повышенным просадкам опор и устранить человеческий фактор при конструировании, монтаже, сборке и эксплуатации. Они могут только выявить и предупредить развитие аварийных ситуаций. Особенность и новизна предлагаемого подхода в том, что если определяются в рассматриваемых узлах напряжения от всех видов воздействий, то все факторы как случайные (закусывания, сейсмические просадки, остаточные дефекты и др.), так и закономерные (индивидуальные расцентровки опор, повторяющиеся от пуска к пуску, средние силы затяжки болтов, центробежные нагрузки и пр.) учитываются данной системой автоматически, и можно предсказывать с заданной степенью вероятности исчерпание ресурса. Но, по крайней мере, такая система поможет выявить режимы работы турбоагрегата с повышенным исчерпанием ресурса и по возможности, избегать их и минимизировать риски появления нерасчетных аварийных ситуаций.

В ближайшей перспективе планируется добавить в систему счетчик ресурса для учета термоциклического повреждения высокотемпературных роторов высокого и среднего давления. Это самостоятельная и сложная задача.

Следовательно, для повышения надежности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования ТЭС и АЭС и предупреждения аварий, связанных с усталостью элементов ротора турбоагрегатов необходимо решить системно *несколько взаимосвязанных задач* с учетом многофакторного анализа [3, 11]:

первая – исключение человеческого фактора:

- для выявления конструкторских ошибок и особенностей турбоагрегата обеспечить мониторинг напряжений в элементах валопровода на всех режимах головного образца турбоагрегата;
- обеспечить единые технологические требования и контроль при выполнении процессов монтажа турбоагрегата, сборки валопровода, в том числе обеспечить единые требования технологической документации;
- с использованием автоматической системы мониторинга и диагностики обеспечить контроль сборки валопровода и опор после монтажа или ремонта.

вторая – мониторинг просадок фундамента-основания.

В процессе эксплуатации следует обеспечить периодический контроль (лучше непрерывный мониторинг) сезонных и постоянных трендов деформации фундамента на уровне горизонтального разъема турбоагрегата, что даст возможность после статистической обработки изменений ВПО от холодного к горячему состоянию корректировать центровки роторов по полумуфтам. Данные периодического контроля фактических осадок опор могут свидетельствовать о значительном изломе линии вала, в том числе сезонном. Максимальные переменные напряжения в болтах полумуфт при значительном изломе могут составить не менее

400–600 МПа с учетом концентрации напряжений. Практика показывает, что процессы просадок фундамента и изменения ВПО происходят часто без достаточного контроля и без оценки последствий этих изменений;

третья – мониторинг тепломеханических процессов в турбоагрегате.

В процессе эксплуатации и мониторинга технического состояния необходимо обеспечить непрерывный контроль вибраций шеек роторов с использованием полной системы датчиков вала [9, 10], в том числе при прохождении при пуске резонансных состояний. Это необходимо сделать для того, чтобы ранее не видимые тепломеханические процессы в опорной системе стали видимыми, только тогда можно управлять надежностью турбоагрегата. В этом случае контролируются повторяющиеся тепломеханические ВПО, что позволяет выполнить мониторинг расцентровок опор и назначить статистически достоверные центровки роторов по полумуфтам.

четвёртая – технологическая и экспериментальная поддержка отрасли.

Необходимо поставить новые экспериментальные исследования для современных сталей с целью определению кривых усталости высокотемпературных образцов при разных уровнях и частотах воздействия для последующего уточнения ресурсных характеристик роторов высокого и среднего давления современных паровых турбин и роторов газовых турбин. Особенно это касается новых высокохромистых сталей на повышенные температуры и роторные стали газовых турбин.

Необходимо на новой приборной базе и с использованием современных компьютерных технологий организовать сбор и обобщение диагностических признаков нескольких десятков дефектов. Такое обобщение необходимо выполнять как с использованием специальных роторных стендов, так и на действующем оборудовании. Такие исследования можно проводить с использованием предлагаемой системы нового поколения;

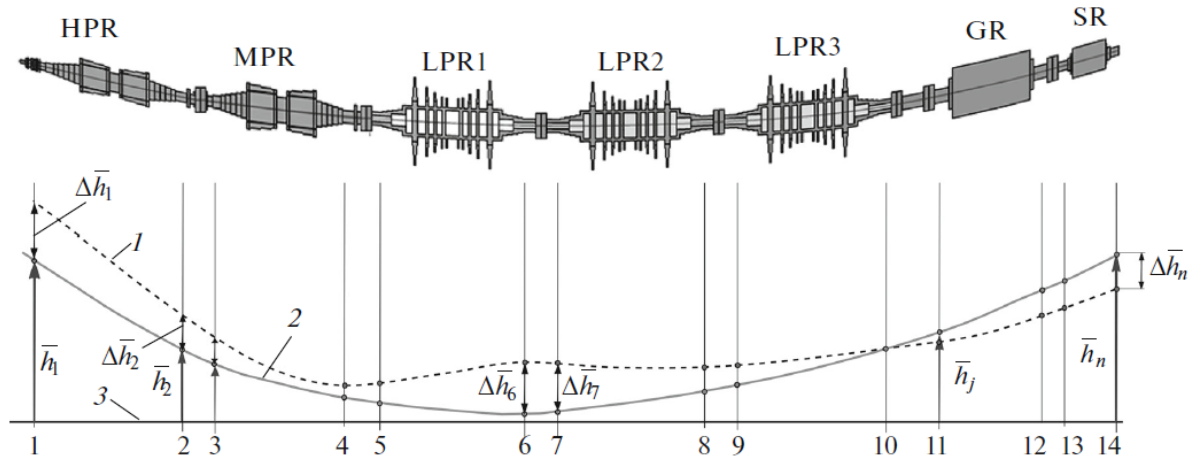
пятая – повышение квалификации в области обеспечения надежности.

Необходимо при крупных холдингах создавать отраслевые центры мониторинга и технической диагностики энергетического оборудования, проводить системно обучение и повышение квалификации всех уровней специалистов, отвечающих за надежность оборудования. Открыть при ведущих вузах специальности по монтажу, ремонту и диагностике энергетического оборудования. Применение систем мониторинга и анализ их работы будет способствовать существенному повышению квалификации ремонтного и обслуживающего персонала ТЭС и АЭС.

Инженерная методика оценки напряженного состояния болтовых соединений полумуфт в эксплуатации с учетом отклонений положения цапф после сборки валопровода

Данная методика рассматривается на примере статической части задачи. Валопровод (см. рисунок) рассматривается как стержень переменного сечения с искомыми отклонениями (линия 1) от номинальной линии вала (линию 2).

Эти отклонения в конечном счете выражаются через отклонения статических реакций опор от номинальных и появления дополнительных напряжений в сечениях валопровода и болтах полумуфт.



Расчётная схема валопровода:

1 – линия расцентрованного валопровода; 2 – идеальная линия валопровода; \bar{h}_j – положение центров расточек подшипников для идеального валопровода; $\Delta \bar{h}_j$ – изменение положения центров расточек подшипников при расцентровках

Методика основана на известном методе переходных матриц с применением суперэлементов для валопровода, составленного из десятков или сотен конечных элементов [12]:

I. Для объекта расчета далее считаются заданными:

геометрические, инерционные и жесткостные характеристики валопровода и опор, в том числе формулярные зазоры в подшипниках и уплотнениях турбоагрегата, расчетные положения шипов в расточках подшипников, температурные режимы основных статорных элементов, температуры и физические свойства смазочной жидкости, статические и динамические податливости собственно опор, формуляры корректирующих центровок роторов по полумуфтам.

II. Для турбоагрегата должны быть предварительно определены:

параметры монтажной линии валопровода в холодном состоянии (если они не заданы в формулярах) [9, 10]; безразмерные статические и динамические характеристики масляной пленки опорных подшипников в широком диапазоне по нагруженности и эксцентриситету с учетом произвольного положения в области возможных перемещений шипа и технологического разброса в допустимых пределах формулярных зазоров [13, 14]; матрица жесткости валопровода от единичных перемещений опор, полученная с учетом податливости масляной пленки и статора-фундамента [9, 10].

III. В статической задаче для каждой опоры рассчитываем осредненные векторы положения цапф в расточках подшипников, которые учитывают фактическое положение цапф в расточке подшипника [9, 13]. При заметных угловых перемещениях цапфы относительно расточки подшипника фиксируем углы поворота цапфы в двух плоскостях.

IV. Осредненные векторы цапф позволяют рассчитать векторы нагруженностей с использованием номограмм [13] и по ним определяем статические силы, действующие в опоре. Если углы положения цапфы относительно расточки подшипника значительны определяем с использованием коэффициентов нагруженности подшипника матрицу угловой статической жесткости масляного слоя [15], и умножая на вектор углов, определяя вектор моментов, дей-

ствующих на цапфу валопровода. Как правило, такими моментами пренебрегают, так как их величины пренебрежительно малы по сравнению с действующими от веса и расцентровок.

V. Рассчитываем по правилам механики моменты в заданных сечениях валопровода, в том числе на стыках полумуфт.

VI. Рассчитываем переменные напряжения в сечениях вращающегося валопровода от сил веса, действующих фактических статических сил от потока рабочего тела (отражающихся в дополнительных статических перемещениях цапф) и от расцентровок опор. Напряжения в болтах полумуфт определяем по справочнику с учетом вычисленных с использованием пакетов «Ансис» или «Космос» податливостей болтов и фланцев.

VII. По полученным напряжениям уточняем техническое состояние болтового соединения с учетом концентрации напряжений в резьбе, головке болта, уточняем распределение нагрузок на элементы болтового соединения. Учитываем вероятные неравномерности напряжений из-за технологических неточностей опирания головок болтов.

VIII. По полученным характеристикам напряженного упруго-пластического состояния определяем коэффициент истощения ресурса за время наблюдения с учетом временных изменений напряженного состояния. Величины истощения ресурса болтовых соединений должны учитываться при продлении их ресурса и принятия решений о своевременной их замене для предотвращения рисков аварий.

IX. Параллельно с вычислением опорных реакций по алгоритмам [9, 10] вычисляем отклонения цапф от идеальной линии вала и расцентровки опор, которые позволяют дать рекомендации по их корректировке в процессе очередного ремонта. Если найденные изменения положения опор и изменения центровок роторов по полумуфтам оказываются в пределах допуска, а соответствующие изменения реакций невелики, то коррекция положения опор не рекомендуется [10].

Если же найденные значения корректирующих центровок превышают допуск и велика вероятность улучшения динамических свойств системы после коррекции центровки валопровода, то последняя рекомендуется к выполнению в период капитального или текущего ремонта. Для исправления центровки в холодном состоянии необходимо к имеющимся формулярным центровкам добавить найденные корректирующие значения.

Выводы

1. Представлены уточненные инженерные методы оценки напряжений и ресурса болтовых соединений роторов в процессе мониторинга с использованием многофакторного анализа.

2. Все факторы, связанные с медленными тепловыми процессами при пуске, останове и переходных режимах турбоагрегата и ошибок центровки роторов приводят к изменению ВПО и учитываются путем измерения и анализа статического всплытия шеек роторов, расчета статической линии вала и напряжений от изгиба при действии собственного веса, расцентровок, центровок роторов.

3. Все факторы, связанные с вибрацией, учитываются через измерение абсолютной вибрации опор и относительной вибрации вала, получения вибрационных напряжений, в том числе

с учетом возможного статического изгиба вала при возникновении прямой синхронной прецессии.

4. Человеческий фактор, связанный с ошибками конструкторов, выявляется путем анализа напряженного состояния элементов валопровода на головных образцах с использованием предлагаемой системы мониторинга «Компакс-Турбо».

5. Человеческий фактор, связанный с ошибками сборки валопровода и другими технологическими нарушениями выявляется путем анализа измерений взаимного статического и динамического положения опор и шеек роторов, а также путем измерения и анализа целого ряда дефектов.

6. Человеческий фактор, связанный с ошибками эксплуатации, приводящими к задеваниям и остаточным прогибам, выявляется путем анализа изменения динамических характеристик роторов в валопроводе.

7. Случайные факторы, связанные с сейсмическими и прочими длительными процессами деформаций статора–фундамента выявляются путем анализа трендов изменения взаимного положения опор, в том числе их скачкообразного изменения, и трендов изменения статических реакций и напряжений в элементах валопровода.

8. Предельное состояние по усталостному разрушению основано на критерии не появления трещин усталости по предельной поврежденности, характеризующей способность материала сопротивляться усталости.

9. При применении автоматической системы мониторинга и диагностики технического состояния к турбоагрегатам, отработавшим определенное время, требуется специальная оценка исчерпания ресурса на момент установки системы.

Список литературы

1. **Куменко А.И.** О путях снижения рисков эксплуатации объектов энергетики [Текст]: сб. материалов VI ШКОЛЫ-СЕМИНАРА “Оценка и управление промышленными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков сложных и уникальных объектов”, 24–26. 08. 2016 г. августа 2016 г. / А.И. Куменко. – Омск: ООО «Омскбланкиздат», 2016. – С. 107–117.

2. **Костюк, А.Г.** Динамика и прочность турбомашин [Текст] / А.Г. Костюк. – М.: Изд-во МЭИ, 2007.

3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Национальная безопасность» (в 6 томах). Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов. Под общей редакцией Махутова Н.А., - М.: МГОФ «Знание», 2015, -600 с.

4. **Куменко, А.И.** Особенности динамического поведения валопроводов турбоагрегатов К-1000-60/1500 и расчет напряжений в болтах при технологических несовершенствах сборки полумуфт [Текст] / А.И. Куменко, А.В. Тимин // Технология машиностроения. –2015. – № 6. Т: – С. 35–40.

5. **Корж, Д.Д.** Концепция определения ресурса роторов с учетом вибрационного нагружения [Текст] / Д.Д. Корж, А.А. Кочетов, А.И. Куменко // Отчетная конференция-выставка по подпрограмме «Топливо и энергетика» научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», Москва, 19–20 декабря, 2001. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – С. 44.

6. **Николаев, В.П.** Разработка статистических методов обеспечения надежности энергетических установок в эксплуатационных условиях [Текст]: Отчет МЭИ по теме №1055 000. В.П. Николаев, Д.Д. Корж, А.И. Куменко. – М., 2000. – 117 с.

7. **Мустафин, Ч.Г.** К определению предела выносливости детали с концентраторами напряжений при асимметричном циле [Текст] / И.Г. Мустафин // Проблемы прочности. – 1978. – № 11. – С. 34–38.

8. **Когаев, В.П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.

9. **Куменко, А.И.** Разработка элементов системы мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС [Текст] / А.И. Куменко, В.Н. Костюков, Н.Ю. Кузьминых [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 8. – С. 17–23.

10. **Куменко, А.И.** Использование датчиков вала для моделирования расцентровок опор валопроводов турбоагрегатов [Текст] / А.И. Куменко, В.Н. Костюков, Н.Ю. Кузьминых [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 9. – С. 41–51.
11. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности [Текст]: в 4 ч. / под ред. К.В. Фролова, Н.А. Махутова. – М.: МГФ «Знание», 2006–2007.
12. **Куменко, А.И.** Совершенствование расчетно-экспериментальных методов исследования динамических характеристик турбоагрегатов и их элементов [Текст]: дис. д-р. техн. наук Куменко Александр Иванович. – М., 1999.
13. **Куменко, А.И.** Диагностика результатов сборки валопровода при эксплуатации с использованием датчиков вала [Текст]/ А.И. Куменко, В.Н. Костюков, С.Н. Бойченко [и др.] // IV научно-технический семинар «Современные технологии сборки». – М., 2015. – С. 50–62.
14. **Куменко, А.И.** Расчет и интерполяция характеристик в области возможных перемещений шеек роторов в опорных подшипниках скольжения крупных энергетических турбоагрегатов [Текст] А.И. Куменко, Н.Ю. Кузьминых, В.Н. Костюков // Теплоэнергетика. – 2016. – № 10. – С. 23–30.
15. **Куменко, А.И.** Исследование вынужденных колебаний системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО) [Текст]: дис. канд. техни. Наук Куменко Александр Иванович. – М., 1978.
16. **Корж, Д.Д.** Исследование влияния отклонений параметров пара при пусках на усталостную поврежденность роторов паровых турбин [Текст]: тезисы докл. Междунар. научно-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования». Д.Д. Корж, Ю.А. Шуклин. – Харьков, 2000.
17. **Корж, Д.Д.** Вероятностная оценка надежности деталей машин [Текст] / Д.Д. Корж. – М.: МЭИ, 1995.
18. **Трухний, А.Д.** Новый подход к оценке ресурса длительной прочности энергетического оборудования в связи с повышением параметров [Текст] / А.Д. Трухний, Д.Д. Корж // Вестник МЭИ. – 1994. – № 3. – С. 57–61.
19. **Биргер, И.А.** Резьбовые и фланцевые соединения [Текст] / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1990.

Открытое акционерное общество
«Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский институт»
(ОАО «ВТИ»)

Общество с ограниченной ответственностью «Диамех 2000»
(ООО «Диамех 2000»)

IX Международная научно-техническая конференция

ПРОБЛЕМЫ ВИБРАЦИИ, ВИБРОНАЛАДКИ, ВИБРОМОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Сборник докладов

22–24 ноября 2017 г.

*Под общей редакцией
канд. техн. наук Д.В. Тарадая*

Москва
ОАО «ВТИ»

УДК 620.178.51:621.311.22

ББК 31.37–5

П-78

П-78 Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций [Текст]: сб. докл. / под общ. ред. канд. техн. наук Д.В. Тарадая // IX Международная научно-техническая конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – 250 с.
ISBN 978-5-905858-21-5

Посвящен широкому спектру вопросов, касающихся проблем вибрации и повышения вибрационной надежности турбин, генераторов и вспомогательного оборудования ТЭС и АЭС.

Рассматриваются такие темы, как современное вибрационное состояние оборудования электростанций, важнейшие повреждения и технологические нарушения последних лет, диагностика, поиск методов и средств предупреждения различных дефектов оборудования с помощью переносной и стационарной аппаратуры; применение новых технологий при ремонте, организация и оптимизация виброналадочного процесса, мониторинг крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов, опыт эксплуатации, перспективы совершенствования надежности и повышения эффективности питательных насосов российских и зарубежных фирм.

Предназначен для широкого круга специалистов-электроэнергетиков и может быть полезен работникам электростанций, научно-технических, проектно-конструкторских и наладочных организаций.

ПМБ ВТИ. РФ, 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14.
Тираж 120 экз. Зак. № 73.

ISBN 978-5-905858-21-5

© ОАО «ВТИ», 2017