

УДК 620.179.14

Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО, д-р техн. наук, проф.; зав. отд. ИПМаш НАНУ, Харьков;
П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, канд. техн. наук, с.н.с.; с.н.с. ИПМаш НАНУ,
Харьков;
Н. Г. ГАРМАШ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ, Харьков;
Ю. Г. ЕФРЕМОВ, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ України

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА СРАБАТЫВАНИЯ РЕСУРСА РОТОРОВ ВЫСОКОГО И СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБИНЫ Т-250/300-240

Представлены основные особенности определения термонапряженного состояния и оценки срабатывания ресурса высокотемпературных роторов высокого и среднего давления паровой турбины Т-250/300-240 на реальных режимах работы турбоагрегата. Для определения фактических режимов работы, граничных условий теплообмена по ступеням и уплотнениям роторов используются данные автоматической системы управления технологическими параметрами (АСУ ТП), определяемые при эксплуатации турбины. Нестационарные температурные поля и термонапряженное состояние в высокотемпературных роторах получены с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Для оценки срабатывания ресурса определяется повреждаемость от малоциклового усталости и ползучести в наиболее опасных зонах роторов.

Ключевые слова: термонапряженное состояние, ротор, турбина, технологические параметры, повреждаемость.

Введение. Для регулирования суточной неравномерности потребления электроэнергии теплофикационные турбины Т-250/300-240 все чаще эксплуатируются на режимах компенсации пиковых нагрузок, которые характеризуются ускоренным срабатыванием ресурса оборудования. При этом значительную часть в накопление повреждаемости материала ротора высокого давления (РВД) при работе на фиксированных параметрах пара с глубокой разгрузкой вносят переходные режимы работы турбоагрегата за счет значительного снижения температуры пара при дросселировании. Результаты ранее проведенных исследований [1] показали, что ресурс турбины Т-250/300-240 определяется напряженностью ее высокотемпературных роторов высокого и среднего давления за счет их повреждаемости от малоциклового усталости (МЦУ) и ползучести. Проблема повышения надежности и безопасности эксплуатации оборудования с минимальными затратами может решаться путем использования новых технологий. Актуальной является оценка термонапряженного состояния и срабатывания ресурса высокотемпературных роторов турбин [2]. При этом важным является учет не только реальных режимов эксплуатации турбоагрегата, которые часто не совпадают с инструкционными, но и порядка их следования. Идентификация этих режимов производится по параметрам системы АСУ ТП. Такие исследования проводились с помощью системы автоматизированной оценки термонапряженного состояния и повреждаемости ротора высокого давления турбины Т-250/300-240 [3]. Система позволяет выявлять наиболее неблагоприятные режимы работы турбоагрегата, которые приводят к повышенному срабатыванию ресурса [4]. В данной работе, в отличие от [4], рассматривается методика оценки срабатывания ресурса ротора среднего давления (РСД-1), при этом диагностирование термонапряженного состояния обоих роторов осуществляется созданной единой автоматизированной системой диагностирования.

© Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Н.Г. Гармаш, Ю.Г. Ефремов, 2015

Постановка задачі. Нагрузка и разгрузка турбоагрегата, обусловленные требованиями энергорынка, осуществляется с различными темпами и величинами изменения мощности. Уменьшение временного интервала при переходе от номинального значения до минимально допустимого при регулировании в сторону уменьшения нагрузки при работе на фиксированных параметрах пара, может вызвать пластические деформации в наиболее напряженных (критических) зонах роторов [1]. Об этом свидетельствуют как расчетные данные по определению интенсивности напряжений, так и появление трещин в таких элементах ротора как галтели на дисках регулирующей ступени, термокомпенсационные канавки диафрагмовых и передних концевых уплотнений.

Одним из средств сохранения ресурса РВД при глубоких разгрузках, наряду с работой при сниженной температуре пара, является работа на скользящих параметрах [5]. Такая технология эксплуатации широко применяется на блоках с барабанными котлами и осваивается на блоках с прямоточными котлами [5]. При работе на скользящих параметрах пара повреждаемость ротора высокого давления на ежедневных переходных режимах турбоагрегата за счет дросселирования пара теряет свою актуальность и большее внимание привлекает массивный ротор среднего давления, который повреждается как на пусковых режимах, так и при ползучести из-за более высокого уровня напряжений, чем в РВД, на расточке в районе 13-ой ступени. Поэтому для оценки срабатывания ресурса турбины Т-250/300-240 необходимо диагностирование термонапряженного состояния в наиболее нагруженных зонах обоих высокотемпературных роторов.

Материалы исследования. Проведенные расчеты теплового и термонапряженного состояний РСД-1 на различных режимах работы показали, что наибольшие повреждения от МЦУ появляются в районе переднего концевого уплотнения (ПКУ) и диафрагменного уплотнения (ДУ) 14 ступени [1], а от ползучести – на расточке в районе 13 и 14 ступени. Диагностика теплового и термонапряженного состояния осуществлялась путем решения осесимметричных задач теплопроводности и термомеханики с использованием метода конечных элементов. Определение нестационарных температурных полей и расчеты кинетики напряженно-деформированного состояния выполняются с использованием методик, позволяющих последовательно решать обе задачи с учетом изменяющихся во времени граничных условий и зависимости свойств материала от температуры. Это позволяет точнее определять максимальные значения напряжений и время их достижения, лишает погрешностей аппроксимации температурных полей и уменьшает трудоемкость расчетов. Для этого используются методики, базирующиеся на МКЭ и разрешающие учитывать важные факторы, необходимые при расчетах напряженно-деформированного состояния элементов энергетического оборудования: сложную геометрию объектов; изменяющиеся во времени граничные условия; неоднородность свойств материала и т.п.

При проведении исследований для РВД И РСД-1 рассматривались два уровня дискретизации меридионального сечения на конечные элементы – с грубой и детальной сетками. Подробная дискретизация использовалась для определения термонапряженного состояния при различных пуско-остановочных и переменных режимах работы. При этом после анализа результатов, были установлены наиболее опасные зоны обоих высокотемпературных роторов, уровень напряжений в которых наиболее высокий (рис. 1). Эти зоны и определяют срабатывание ресурса высокотемпературных роторов в целом. В системе диагностики термонапряженного

состояния и оценки срабатывания ресурса турбины на фактических режимах работы турбоагрегата в автоматизированном режиме использовалась грубая дискретизация.



Рис. 1 – Расчетная схема РВД и РСД-1

Она не учитывает все детали геометрии тепловых канавок, а термонапряженное состояние на дне тепловых канавок вычисляется с использованием коэффициентов концентрации по номинальным напряжениям на поверхности и на глубине дна тепловых канавок согласно [6]

$$\sigma_{i \max} = \sigma_{i1} + 2 \sqrt{\frac{h}{\rho}} (0,42\sigma_{i0} + 0,58\sigma_{i1}) A, \quad (1)$$

где σ_{i0} – интенсивность напряжений на радиусе дна тепловой канавки; σ_{i1} – интенсивность напряжений на поверхности ротора в зоне канавки; h – глубина канавки; ρ – радиус кривизны канавки; $A = 1 - e^{-0,3l/h}$, где l – расстояние между канавками.

Величины коэффициентов, которые входят в формулы для вычисления напряжений с учетом их концентрации, были скорректированы для совпадения с результатами, полученными по расчетной схеме с детальной дискретизацией.

Повреждаемость от малоциклового усталости при сложной нерегулярной нагрузке определяется по местным условно упругим напряжениям с помощью методики, разработанной на базе принципа Нейбера [4, 7]. При этом используются модель Мазинга-Афанасьева, эффект памяти материала, замкнутость циклов нагружения, размах эквивалентных упруго-пластических деформаций в циклах и правило линейного суммирования повреждений. Повреждения рассчитываются по амплитудным значениям эквивалентных условно упругих деформаций в зонах диагностирования и так называемым расчетным температурам в этих зонах с использованием обобщенной диаграммы упруго-пластического циклического деформирования стали и изотермических экспериментальных кривых МЦУ [7].

В цельнокованых роторах паровых турбин, которые испытывают влияние высоких температур, особое внимание отводится поверхности осевого канала (расточка), поскольку напряжение в этих зонах обусловлены, в основном, центробежными силами, и там могут оставаться не выявленными литейные микродефекты. Максимальные напряжения на поверхности расточки роторов наблюдаются в районе последних ступеней, где лопатки имеют максимальную длину и наиболее интенсивно нагружают ротор. Однако, более всего опасной, с точки зрения исчерпания ресурса по длительной прочности, оказывается область, расположенная под двумя первыми ступенями, где температура металла максимальна.

Зона осевого канала высокотемпературных роторов турбины Т-250/300-240 является максимально напряженной вследствие массивности дисков. На стационарном режиме в этой зоне температура может достигать 515 °С, поэтому при определении повреждаемости от ползучести целесообразно рассматривать именно эту зону. В результате проведенных исследований было установлено, что поверхность расточки вследствие высоких напряжений и температуры в наибольшей мере подвергается действию ползучести. Поэтому оценка повреждаемости материала от ползучести проводится в 6 и 11 зонах диагностирования (рис. 1). Зоной контроля повреждаемости

металла от ползучести есть также передняя галтель диска первой ступени (зона 7, рис. 1), где температура металла на стационарном режиме максимальная и достигает 521 °С. Следует отметить, что в зоне 7 могут наблюдаться существенные повреждения и от МЦУ. В работе используется численное моделирование высокотемпературной ползучести ротора с применением уравнений теории типа течения с анизотропным упрочнением, которые учитывают направленный характер упрочнения и явление обратной ползучести [7].

Срабатывание ресурса высокотемпературных роторов паровых турбин существенно зависит от качества проведения пуско-остановочных режимов, что подтверждается фактическими данными эксплуатации. Поэтому для обеспечения безаварийной работы оборудования возникает необходимость организации непрерывного (эксплуатационного) контроля термонапряженного состояния роторов высокого и среднего давления на фактических режимах работы.

Созданное методическое и программное обеспечение позволяет определять накопление повреждений в наиболее опасных зонах высокотемпературных роторов в процессе эксплуатации. Как показали ранее проведенные исследования срабатывания ресурса высокотемпературных роторов турбины Т-250/300-240 [1], от ползучести повреждаемость больше в роторе среднего давления. При пуско-остановочных режимах в тепловых канавках ПКУ больше повреждается РВД и меньше РСД-1 (при пусках из горячего состояния). При пусках из холодного состояния наибольшие повреждения возникают в районе первого диафрагмового уплотнения и внутреннего уплотнения РВД и несколько меньшие – в первом диафрагмовом уплотнении РСД-1. В канавках ПКУ РВД при пусках из неостывшего и холодного состояния повреждения значительно меньше.

Созданная ранее автоматизированная система диагностики термонапряженного состояния и оценки ресурса [3, 4] была значительно расширена с учетом особенностей работы турбоагрегата на скользящих параметрах. Для успешного ее функционирования для обоих высокотемпературных роторов потребовалось использование дополнительных технологических параметров. Кроме частоты вращения ротора $\omega(t)$; температуры острого пара перед стопорными клапанами $T_n(t)$, усредняющегося по данным для правой и левой нитей трубопроводов; давления острого пара перед стопорными клапанами $P_n(t)$; активной мощности генератора $N_r(t)$; расхода острого пара $G(t)$; температуры пара в стационарном коллекторе $T_k(t)$, поступающего на лабиринтные уплотнения цилиндра высокого давления; давления пара в коллекторе $P_k(t)$; давления в конденсаторе $P_w(t)$, которые получались с АСУ ТП ранее, использовалась температура промперегрева $T_{пп}(t)$.

Выбранные технологические параметры АСУ ТП архивируются каждые 30 секунд в виде отдельных файлов за определенный период. По этим данным с помощью специального программного обеспечения анализируется изменение параметров и готовится новый файл, в котором задаются шаги по времени и значение параметров для вычисления граничных условий теплообмена. Этот файл, а также файл, в котором находятся данные расчетной схемы роторов, свойства материала и другая необходимая информация, используются программным модулем для вычисления повреждений за определенный отрезок времени с учетом реальной истории нагружения.

Программное обеспечение по изменению технологических параметров во времени позволяет определять режим работы турбины, в соответствии с которым по специальным таблицам и алгоритмам [3] определяются граничные условия

теплообмена на участках высокотемпературных роторов. Для РСД-1 эти таблицы были получены и занесены в систему диагностирования, для РВД – скорректированы с учетом особенностей работы на скользящих параметрах. Далее на их основе моделируются нестационарные температурные поля и термонапряженное состояние в роторах, на основе которых вычисляется повреждение материала от МЦУ и ползучести в выбранных для диагностирования опасных зонах роторов (рис. 1). Повреждаемость от каждого замкнутого цикла нагружения и накопленные повреждения за весь период работы турбины архивируются в специальных электронных журналах автоматизированной системы диагностирования [3, 4].

Работоспособность предложенных алгоритмов и разработанного программного обеспечения проверена с использованием реальных параметров АСУ ТП турбоагрегата Т-250/300-240 Киевской ТЕС-5. Возможности графического интерфейса системы диагностирования [4], позволяющего за любые сутки провести анализ изменения параметров АСУ ТП, определяющих режим работы турбоагрегата, изменение во времени температур и напряжений и получить информацию о дате и времени поврежденности от малоциклового усталости и ползучести в точках диагностирования, были расширены с учетом дополнительных технологических параметров, а также данных для ротора среднего давления. В качестве примера, на рис. 2 представлено изменение во времени параметров АСУ ТП, температур и эквивалентных напряжений в точках 1–5 ротора высокого давления и 11–12 ротора среднего давления (рис. 1) 23.10.2014 г., полученные при диагностировании термонапряженного состояния высокотемпературных роторов турбины с использованием реальных параметров АСУ ТП турбоагрегата Т-250/300-240 за октябрь 2014 г.

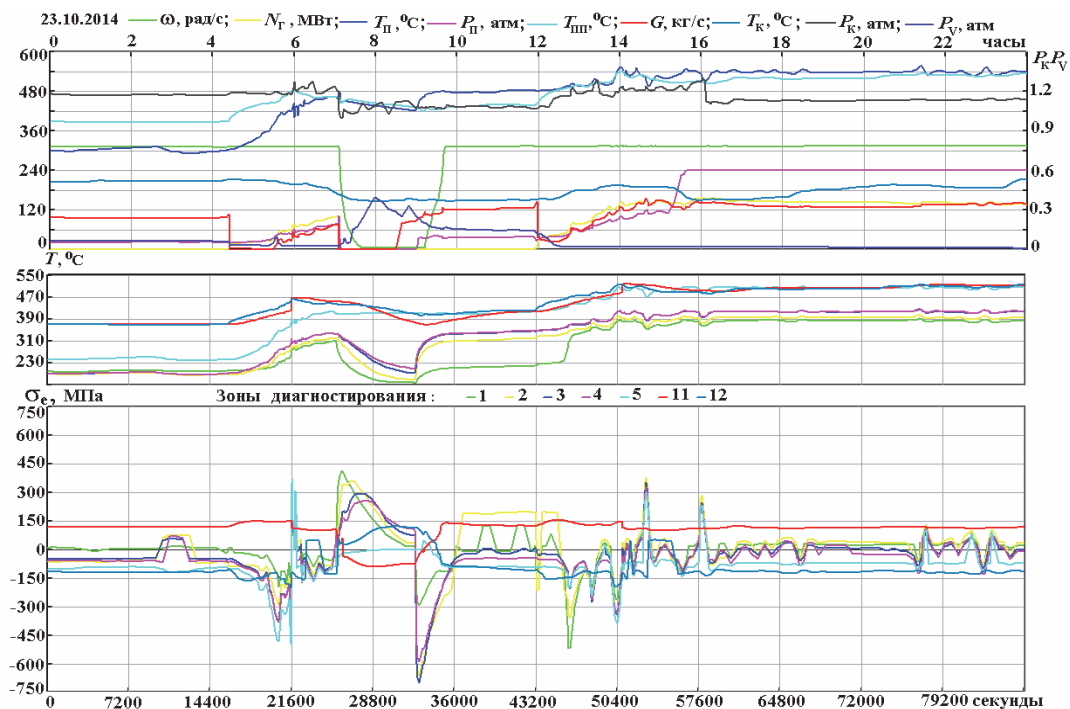


Рис. 2 – Изменение во времени технологических параметров АСУ ТП, температур и напряжений в точках диагностирования РВД и РСД-1

Выводы. В работе излагается впервые созданная методика одновременной оценки срабатывания ресурса РВД и РСД-1 на примере роторов турбины Т-250/300-240. Диагностирование термонапряженного состояния и оценка ресурса

высокотемпературных роторов высокого и среднего давления турбины Т-250/300-240 производится на фактических режимах эксплуатации турбоагрегата с учетом истории нагружения материала и использованием его экспериментальных прочностных характеристик, зависящих от температуры. Режимы работы определяются по технологическим параметрам, получаемым от АСУ ТП, установленной на турбоагрегате. Система автоматизированной оценки термонапряженного состояния и повреждаемости высокотемпературных роторов турбины Т-250/300-240 позволяет оценить срабатывание ресурса в процессе эксплуатации, определить наиболее опасные пуско-остановочные режимы работы по критерию срабатывания ресурса и выработать рекомендации для проведения щадящих маневренных режимов турбоагрегата, что позволяет повысить надежность и безопасность его работы.

Список литературы: 1. Шульженко, Н. Г. Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований) [Текст] : моногр. / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с. – ISBN: 978-3-8465-1493-1. 2. Определение расчетного ресурса и оценка живучести роторов и корпусных деталей турбин. Методические указания: СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-52:2011 [Текст] / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин, И. И. Мележик, А. В. Пожидаев. – Киев : ОЕП "ГРИФРЭ" ; М-во енергетики и угольной промышленности Украины, 2011. – 48 с. 3. Розробка системи діагностики термонапруженого стану та лічильника ресурсу роторів турбін (проект 2.10) [Текст] / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Ю. І. Матюхін, Н. Г. Гармаш, В. П. Гонтаровський // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»: збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. – Київ, 2012. – С. 250–256. 4. Шульженко, Н. Г. Автоматизированная оценка срабатывания ресурса высокотемпературного ротора турбины [Текст] / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин, Н. Г. Гармаш, В. П. Гонтаровский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 13(1056). – С. 39–45. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X. 5. Мацевитый, Ю. М. Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭЦ путем модернизации, реконструкции и совершенствования режимов их эксплуатации [Текст] : моногр. / Ю. М. Мацевитый [и др.]. – Киев : Научная мысль, 2008. – 366 с. 6. РТМ 108.021.103-85. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость [Текст]. – Взамен РТМ 108.021.103-76 ; введ. 01.07.86. – Ленинград : НПО ЦКТИ, 1986. – 48 с. 7. Методика оперативної оцінки пошкодженості матеріалу ротора турбіни при циклічному навантаженні і повзучості [Текст] / М. Г. Шульженко, Ю. І. Матюхін, Н. Г. Гармаш, О. В. Пожидаев, В. П. Гонтаровський // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 5. – С. 46–52. – ISSN 0131-2928.

Bibliography (transliterated): 1. Shul'zhenko, N. G., P. P. Gontarovskij and B. F. Zajcev. *Zadachi termoprochnosti, vibrodiagnostiki i resursa jenergoagregatov (modeli, metody, rezul'taty issledovanij)*. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. ISBN: 978-3-8465-1493-1. Print. 2. Shul'zhenko, N. G., et al. *Opredelenie raschetnogo resursa i oценка zhivuchesti rotorov i korpusnyh detalej turbin. Metodicheskie ukazaniya: SOU-N MEV 40.1-21677681-52:2011*. Kiev : OEP "GRIFRJe" ; M-vo jenergetiki i ugol'noj promyshlennosti Ukrainy, 2011. Print. 3. Shul'zhenko, M. G., et al. "Rozrobka systemy diagnostyky termonapruzenoho stanu ta lichyl'nyka resursu rotoriv turbin (proekt 2.10)." *Cil'ova kompleksna programma NAN Ukrai'ny "Problemy resursu i bezpeky ekspluatacii' konstrukcij, sporud ta mashyn"*: zbirnyk naukovykh statej za rezul'tatamy, otrymanymy v 2010–2012 g. Kiev : Instytut elektrozvarjuvannja im. Je.O.Patona NAN Ukrai'ny, 2012. Pint. 4. Shul'zhenko, N. G., et al. "Avtomatizirovannaja oценка srobatyvannija resursa vysokotemperaturnogo rotora turbiny." *Visnyk NTU "KhPI". Serija: Energetychni ta teplofizychni procesy j ustatkuvannja*. No 13(1056). Kharkiv : NTU "HPI", 2014. 39–45. ISSN 2078-774X. Print. 5. Macevityj, Ju. M., et al. *Povyshenie jenergojeffektivnosti raboty turboustanovok TJeS i TJeC putem modernizacii, rekonstrukcii i sovershenstvovanija rezhimov ih jekspluatacii*. Kiev : Nauchnaja mysl', 2008. Print. 6. РТМ 108.021.103-85. *Detali parovyh stacionarnyh turbin. Raschet na malociklovuju ustalost'*. Leningrad : NPO CKTI, 1986. Print. 7. Shul'zhenko, M. G., et al. "Metodika operativnoї ocinki poshkodzenosti materialu rotora turbini pri ciklichnomu navantazheni i povzuchosti." *Probl. mashinostroenija*. No 14.5. 2011. 46–52. ISSN 0131-2928.

Поступила (received) 02.01.2015