

УДК 621.311.22

## Моделирование износа элементов теплоэнергетического оборудования

Митюшов А.А., инж.

Рассмотрена проблема оценки состояния элементов оборудования по результатам технической диагностики. Предложено проводить оценку доли истощения ресурса отдельно по каждому критическому параметру, для которого установлены критические значения. Предлагается математическая модель, описывающая износ оборудования вследствие статических напряжений детерминированной функцией и износ вследствие динамических напряжений случайной функцией. Для определения вида и параметров функций предложено использовать нейронные сети, для обучения которых задействовать массив результатов обследования однотипных элементов.

*Ключевые слова:* теплоэнергетическое оборудование, износ, остаточный ресурс, нейронные сети.

## Simulation of Thermal Power Equipment Elements Wear

A.A. Mitushov, Engineer

The problem of assessing of thermal power equipment elements state is considered. It is proposed to estimate the parts of the residual resource separately for each critical parameter that has the critical value. A mathematical model describing the equipment deterioration is proposed. In accordance with this model static stresses described by deterministic function and dynamic stresses described by random function are caused equipment deterioration. Using neural networks is proposed to determine the type and parameters of functions, an array of similar items survey results should be involved.

*Keywords:* thermal power equipment, deterioration, residual resource, neural network.

Основная проблема энергетики России состоит в том, что большинство тепловых электростанций были введены в эксплуатацию в 1960–1985 гг. и основное оборудование электростанций в настоящее время истощило парковый ресурс. Существующие тарифы на электроэнергию, цены на оборудование и существующий во многих регионах резерв энергетической мощности делают малопривлекательными инвестиции в энергетику, за счет которых можно было бы заменить устаревшее оборудование на новое или заменить наиболее ответственные элементы, выработавшие парковый ресурс. В этих условиях единственным реальным вариантом является эксплуатация существующего оборудования с заменой элементов, истощивших свой индивидуальный ресурс.

Такой подход к обеспечению надежности работы стареющего оборудования предполагает проведение полномасштабной диагностики состояния элементов оборудования, разрушение которых может привести к возникновению аварийных ситуаций, и оценку продолжительности безопасной эксплуатации каждого элемента, т.е. его остаточного ресурса.

Согласно Типовой инструкции по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций [1] дальнейшая эксплуатация оборудования после выработки паркового ресурса допускается только при положительных результатах технического диагностирования, причем оценка технического состояния проводится несколькими методами, основанными на различных физических явлениях.

Для каждого из ответственных элементов оборудования разработаны свои критерии оценки состояния, обеспечивающие дальней-

шую безопасную эксплуатацию. Однако их все можно свести к четырем основным требованиям:

- 1) отсутствие заранее оговоренных недопустимых дефектов;
- 2) изменение микроструктуры металла не должно выходить за определенные границы;
- 3) остаточная деформация не должна превышать определенной величины;
- 4) толщина стенок элемента должна обеспечивать его целостность при ожидаемых рабочих напряжениях и температурах.

В том случае, если элемент не соответствует хотя бы одному из вышеназванных требований, он должен быть заменен, для остальных элементов в пределах остаточного ресурса разрешается эксплуатация до следующего обследования.

Принципиальным моментом в этой схеме обеспечения безопасной работы оборудования, которому, на наш взгляд, уделяется недостаточное внимание, является прогнозирование износа элемента при дальнейшей эксплуатации.

В том случае, если выявлены недопустимые дефекты или состояние элемента позволяет уверенно утверждать, что износ невелик и можно рассчитывать на длительную безопасную работу, проблемы с оценкой остаточного ресурса не существует. В первом случае дальнейшая эксплуатация такого элемента прекращается, а во втором – допустимы значительные погрешности в оценке, так как при последующем обследовании эту оценку можно уточнить.

Более сложная и неприятная ситуация возникает в том случае, когда величина остаточного ресурса сопоставима с межремонтным интервалом. В этом случае более высокие требования должны предъявляться как к оценке текущего состояния элемента, так и к прогнозированию его состояния на продолжительность эксплуатации до следующего обследования. Более жесткие оценки текущего состояния и интенсивности износа приводят к завышенным затратам на замену еще годного оборудования, а излишне оптимистичные оценки – к возможности возникновения аварий и более значительным потерям на ликвидацию последствий аварий.

Первые трудности возникают при количественной оценке степени износа. В результате диагностики состояния измеряются некоторые отдельные параметры, с разных сторон характеризующие состояние объекта. В частности, при обследовании паропроводов появляются данные о микроструктуре металла, величине остаточной деформации и толщине стенок. Каждый из этих параметров содержит лишь частичную информацию о степени износа.

В ряде работ [2] и нормативных документов [3] используется обобщенная характеристика – доля исчерпания ресурса или доля остаточного ресурса  $\beta$ , определяющая, какая часть индивидуального ресурса элемента израсходована на момент обследования. По каждому из оцениваемых параметров определяется вклад в износ оборудования, далее эти вклады суммируются с учетом их весов и по сумме оценивается категория опасности дальнейшей эксплуатации элемента. В соответствии с категорией опасности принимается доля исчерпания ресурса. Такой подход, с одной стороны, учитывает многообразие процесса износа и дает комплексную оценку состояния оборудования. Однако суммирование вкладов по различным параметрам даже с учетом весовых коэффициентов и пересчет суммы на долю исчерпания ресурса вносят определенную субъективность в результаты оценки.

Элементы оборудования бракуются не по суммарной характеристике, а по отдельным параметрам, измеряемым в процессе диагностики. Из этого следует, что более объективной и наглядной является раздельная оценка остаточного ресурса по критическим параметрам. В частности, не допускаются к эксплуатации работающие в условиях ползучести трубы, если остаточная деформация  $\varepsilon$  на прямых трубах превышает предельную величину  $\varepsilon_{пред} = 1,5\%$  или микроповрежденность структуры металла выше 4-го балла по стандартной шкале микроповрежденности [1]. При этом минимальная толщина стенок трубы  $\delta$  должна быть больше предельно допустимой  $\delta_{пред}$ . Кроме того, дополнительно регламентируются механические свойства сталей, поэтому логично принять, что доля исчер-

пания ресурса трубы по остаточной деформации составляет

$$\beta_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{пред}}. \quad (1)$$

Соответственно, доля исчерпания остаточного ресурса по толщине стенки определяется как

$$\beta_{\delta} = \frac{\delta - \delta_{пред}}{\delta_0 - \delta_{пред}}, \quad (2)$$

где  $\delta_0$  – толщина стенки в начале эксплуатации.

Некоторые затруднения могут возникнуть при оценке доли исчерпания ресурса по микроструктуре металла. Оценка состояния микроструктуры является дискретной, при этом невелико количество допустимых значений (с первого по четвертый балл). Оценка доли исчерпания ресурса по этой шкале будет недопустимо грубой. Ситуацию можно легко изменить, используя 13-балльную шкалу поврежденности микроструктуры [3].

Следующие трудности возникают при оценке состояния элемента на будущий период эксплуатации. Действующая в теплоэнергетике методика экстраполирует долю исчерпания ресурса по прямой, проходящей из начала координат  $\tau - \beta$  через точку  $\beta_n$ , полученную при последнем обследовании и соответствующую наработке элемента  $\tau_n$ . Однако результаты диагностики, проведенной в различные периоды эксплуатации оборудования, показывают, что экспериментальные точки значительно отклоняются от усредненной прямой. Это свидетельствует, во-первых, о том, что реальный процесс износа оборудования может существенно отличаться от линейной зависимости, и, во-вторых, о существенном влиянии случайных факторов. В этой связи каждый результат обследования должен рассматриваться как единственный результат реализации случайного процесса. Поэтому при прогнозировании остаточного ресурса необходимо учитывать как последние данные диагностики, так и предысторию процесса износа, т.е. результаты предыдущих обследований.

В атомной энергетике для прогнозирования остаточного ресурса используется методика, основанная на представлении износа оборудования в виде случайного процесса [5]. Принимается, что математическое ожидание доли исчерпания ресурса соответствует некоторой двухпараметрической модельной функции, аргументом которой является наработка элемента. Предполагается, что коэффициенты этой функции, представляющие собой случайные величины, распределены по нормальному закону. Параметры распределения находятся статистической обработкой результатов обследования однотипных элементов. Методика позволяет оце-

нить вероятность достижения предельного состояния в определенный момент времени или величину остаточного ресурса при заданной вероятности отказа путем проведения статистических испытаний методом Монте-Карло. Эта методика в большей степени отражает особенности процесса износа, но при этом априори принимает нормальное распределение параметров модельного процесса и основывается на монотонных функциях.

Процесс износа происходит под воздействием статических напряжений, зависящих в основном от нагрузки оборудования и конструкции элемента, и от динамических напряжений, возникающих при изменении режима работы оборудования. Статические напряжения достаточно стабильны, их значения приблизительно одинаковы для однотипных элементов различных объектов. Поэтому и долю износа оборудования, вызванного этими напряжениями, можно считать детерминированной величиной, зависящей от уровня нагрузки и продолжительности работы элемента.

Динамические напряжения более изменчивы и зависят от ряда факторов, учет которых сложен или вообще невозможен. Их вклад в износ элемента носит принципиально индивидуальный характер, именно их влиянием объясняются различия в состоянии однотипных элементов, работающих одинаковое время приблизительно в одинаковых условиях.

Если принять, что интенсивность износа зависит только от состояния элемента и величины напряжений в текущий момент времени, то кинетику изменения доли истощения ресурса можно описать уравнением

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} = f_1(N, \beta) + f_2(N, \beta), \quad (3)$$

где  $f_1$  – детерминированная функция, отражающая влияние статических напряжений;  $f_2$  – случайная функция, связанная с динамическими нагрузками.

Конкретный вид функций и значения их параметров должны быть определены по результатам диагностики элементов оборудования. В простейшем случае, когда износ прямо пропорционален наработке элемента, функция  $f_1(N, \beta)$  принимает вид

$$f_1(N, \beta) = \alpha_1, \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  – некоторая постоянная величина.

Функция  $f_2(N, \beta)$ , моделирующая увеличение износа вследствие влияния динамических напряжений, не может быть отрицательной ( $f_2(N, \beta) \geq 0$ ). Если не учитывать влияние нагрузки и текущего состояния, эту функцию можно заменить случайной величиной  $\alpha_2$ , распределенной по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda$ :

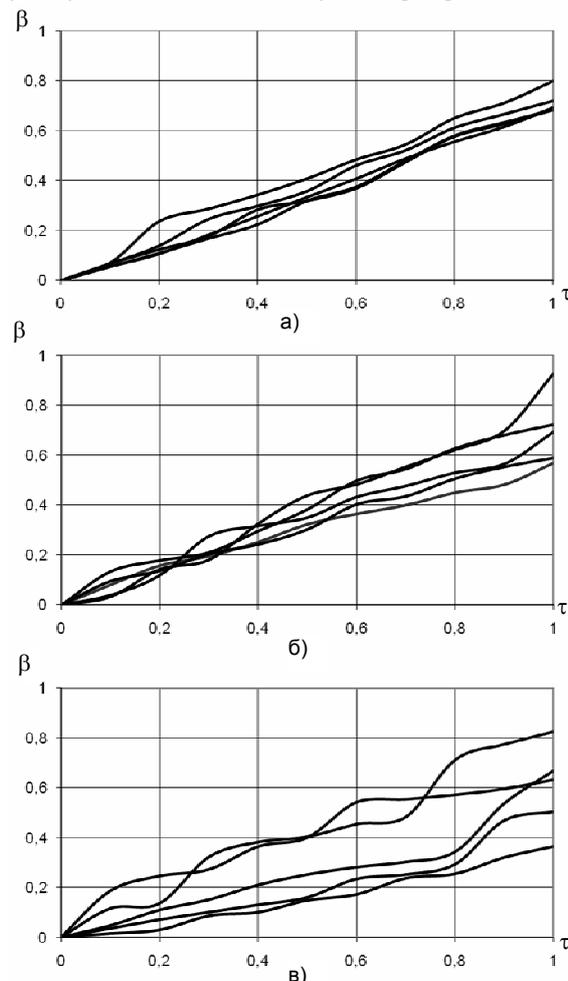
$$f_2(N, \beta) = \alpha_2. \quad (5)$$

Согласование расчетных и наблюдаемых значений остаточного ресурса производится соответствующим выбором вида и значений параметров функций  $f_1(N, \beta)$  и  $f_2(N, \beta)$ .

На рисунке приведены результаты моделирования динамики изменения остаточного ресурса оборудования для различных комбинаций параметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Значения  $\alpha_2$  вычислялись по формуле [7]

$$\alpha_2 = -\frac{1}{\lambda} \ln(\xi), \quad (6)$$

где  $\xi$  – случайная величина, равномерно распределенная на интервале [0, 1].



Возможное изменение остаточного ресурса: а –  $\alpha = 0,5; \lambda = 50$ ; б –  $\alpha = 0,3; \lambda = 30$ ; в –  $\alpha = 0,1; \lambda = 20$

Результаты расчета свидетельствуют о том, что, во-первых, соответствующим выбором параметров функций можно существенно влиять на развитие прогнозируемого процесса, и, во-вторых, вид кривых, соответствующих нескольким реализациям единого случайного процесса, не противоречит результатам диагностики состояния реальных объектов. Используя методику статистического моделирования, на основании анализа вариантов развития процесса износа можно с заданной вероятностью оценить состояние элемента после определенной продолжи-

тельности наработки  $\Delta t$  или величину остаточного ресурса  $\tau_{рес}$ .

Достоверность результатов прогнозирования обеспечивается удачным выбором вида функций  $f_1(N, \beta)$  и  $f_2(N, \beta)$ , адекватно отражающим реальный процесс износа. Непосредственная статистическая обработка результатов наблюдений с использованием метода наименьших квадратов возможна только для предварительно заданного общего вида функции  $f_1(N, \beta)$  и вида распределения случайных параметров функции  $f_2(N, \beta)$ . Многовариантность выбора этих характеристик способствует субъективности получаемых оценок.

Существенную помощь в прогнозировании остаточного ресурса могут оказать модели, основанные на использовании искусственных нейронных сетей, являющихся перспективной альтернативой традиционным методам решения нелинейных задач прогнозирования временных рядов [8].

Задачи прогнозирования, для решения которых используются нейронные сети, можно охарактеризовать следующим образом: отсутствуют четкие алгоритмы решения задачи; накоплено достаточное количество примеров прогнозируемого поведения исследуемой системы; данные, на основе которых строится прогноз, зашумлены, неполны или избыточны, частично противоречивы.

Нейронная сеть представляет собой некоторое множество формальных нейронов, объединенных между собой определенным образом. Структура объединения нейронов определяет топологию нейронной сети. Существенным достоинством нейронной сети является ее обучение с использованием данных предыдущих обследований. Общий вывод о качестве обучающей выборки делается на основе соотношения повторяемости и противоречивости.

Процесс прогнозирования состоит из следующих этапов:

1. Выбор архитектуры нейронной сети.
2. Обучение нейронной сети.
3. Тестирование сети на контрольном множестве данных и при необходимости ее дообучение.
4. Использование нейронной сети в качестве средства прогнозирования (этап ее фактического использования по назначению).
5. Возможное дообучение сети при появлении результатов новых обследований.

Для прогнозирования предлагается использовать сигмоидальную нейронную сеть с прямой передачей сигнала, в которой количество скрытых слоев и нейронов уточняется в процессе обучения сети по результатам данных о величине полученных ошибок, а размерность входного слоя определяется количеством элементов входного вектора. Выходной слой сети содержит один нейрон, имеющий линейную функцию активации, а его выходной сиг-

нал представляет собой собственно прогнозируемое значение параметра, характеризующего степень износа элемента. Для корректировки параметров сети – синаптических весов и смещений – предлагается использовать один из градиентных алгоритмов обучения сети (алгоритм градиентного спуска, алгоритм градиентного спуска с возмущением, алгоритм градиентного спуска с выбором параметра скорости обучения или пороговый алгоритм обратного распространения ошибки). Окончательный выбор алгоритма обучения должен быть сделан в ходе проведения экспериментов на основе данных о величине суммарной ошибки и скорости обучения.

Основным достоинством нейронных сетей является отсутствие необходимости в выборе модельного процесса и задании закона распределения данных. Алгоритм обучения сам находит необходимые зависимости и строит аналоги. Кроме того, при получении новых количественных значений прогнозируемой величины можно «дообучить» спроектированную сеть, тем самым повысить качество следующего прогноза. Недостаток этого метода заключается в том, что для обучения сети необходимо достаточно большое количество исходных данных. Эти данные можно взять с диагностики состояния подобных элементов, работающих приблизительно в одинаковых условиях.

Предлагаемый метод оценки состояния элементов оборудования и прогнозирования их остаточного ресурса не противоречит нормативным материалам, так как на данном этапе он рассматривается в виде дополнительного наряду с действующими нормативными методиками. Целесообразность его использования должны подтвердить или опровергнуть результаты практического использования.

#### Список литературы

1. **РД 10-577-03.** Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.
2. **Живучесть** стареющих тепловых электростанций / Под ред. А.Ф. Дьяконова и Ю.Л. Израилева. – М.: Изд-во НС Энас, 2000.
3. **РД 153-34-20.605-2002.** Отраслевая система индивидуального мониторинга повреждений ответственных элементов оборудования, зданий и сооружений региональных центров «Живучесть стареющих ТЭС».
4. **СО 153-34.17.470-2003.** Инструкция о порядке обследования и продления срока службы паропроводов сверх паркового ресурса.
5. **Клемин А.И.** Надежность ядерных энергетических установок: Основы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. **Чайковский Ю.В.** О природе случайности. Вып. 27. «Ценологические исследования». – М.: Центр системных исследований – Институт истории естествознания и техники РАН, 2004.

7. **Соболь И.М.** Численные методы Монте-Карло. – М.: Наука, 1973.

8. **Аксенов С.В., Новосельцев В.Б.** Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии). – Томск: Изд-во НТЛ, 2006.

Митюшов Алексей Александрович,  
ОАО «ОГК-6»,  
генеральный директор,  
адрес: г. Москва, проспект Вернадского, д.101/3,  
телефон (495) 428-53-01.