

УДК 519.248

А. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Парогенераторостроения»

Т. В. ПОТАНИНА, канд. техн. наук

В. Л. КАВЕРЦЕВ, канд. техн. наук

Т. А. ГАРКУША, научный сотрудник

Т. А. ЕСИПЕНКО, научный сотрудник

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,

г. Харьков

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРВАЛЬНОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕМОНТОВ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС И АЭС

*Задачи оптимизации планирования и организации ремонтных работ на энергоблоках ТЭС и АЭС и расчета их коэффициентов готовности на основе результатов диагностики технического состояния оборудования являются одними из наиболее важных и актуальных проблем энергетики. В статье предложены методы анализа диагностических параметров оценки состояния оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС, основанные на методах статистики интервальных данных. Показано влияние продолжительности ремонтных работ на коэффициент готовности энергоблоков ТЭС и АЭС.*

*Завдання оптимізації планування і організації ремонтних робіт на енергоблоках ТЕС і АЕС і розрахунку їх коефіцієнтів готовності на основі результатів діагностики технічного стану устаткування є одними з найбільш важливих і актуальних проблем енергетики. У статті запропоновані методи аналізу діагностичних параметрів оцінки стану устаткування енергоблоків ТЕС і АЕС, які засновані на методах статистики інтервальних даних. Наведено вплив тривалості ремонтних робіт на коефіцієнт готовності енергоблоків ТЕС і АЕС.*

### Постановка проблемы

Одними из наиболее важных и актуальных проблем тепловой и атомной энергетики являются задачи оптимизации планирования и организации ремонтных работ на энергоблоках электростанций и расчета их коэффициентов готовности на основе результатов диагностики технического состояния оборудования. Своевременное и эффективное решение этих задач в практике эксплуатации энергоблоков ТЭС и АЭС позволяет повысить экономическую эффективность проведения ремонтных работ и определить оптимальный резерв мощности энергосистемы, необходимый для компенсации недовыработки электроэнергии из-за простоя энергоблоков во время ремонтов, обеспечив, таким образом, стабильность работы энергосистемы [1–3].

Опыт эксплуатации ряда зарубежных ТЭС и АЭС, показатели коэффициента использования установленной мощности которых уже на протяжении многих лет остаются достаточно высокими, показывает, что достижение столь высоких показателей обусловлено, главным образом, внедрением организационно-технических мероприятий по сокращению и оптимизации продолжительности и объемов ремонтных работ [4]. При этом реализация концепции ремонтов по техническому состоянию возможна, в том числе, и за счет применения всесторонних и эффективных систем диагностики.

### Формирование целей статьи

Внедрение ремонтов энергоблоков по техническому состоянию оборудования в эксплуатационную практику на ТЭС и АЭС во многом зависит от определения достаточного для принятия решений объема диагностических признаков, их идентификации и методов обработки. В процессе эксплуатации технические системы и оборудование энергоблоков подвергаются влиянию значительного количества возмущающих факторов, часто

стохастических по своей природе, происходит рассеивание параметров технического состояния диагностируемого оборудования, имеет место фактор неопределенности. Поэтому адекватность диагностических моделей, обоснованность принятия решений о выведении оборудования в ремонт и определение оптимальной длительности межремонтного периода зависят от учета нечеткой информации о состоянии оборудования и ее суммарной неопределенности, которая накапливается за время эксплуатации.

### Основная часть

Техническое состояние оборудования энергоблока в период эксплуатации определяется значениями множества диагностических признаков (функций)  $D(W)$ , которые являются мерами качества его функционирования в момент времени  $\tau_j, \tau_j \in [\tau_0, \tau]$ . Автоматизированную диагностику технического состояния оборудования энергоблока ТЭС и АЭС можно проводить с помощью математических моделей технологических процессов, происходящих в оборудовании и объединенных в имитационную модель энергоблока [5-6]. Имитационная модель энергоблока, организованная в виде логико-числовых операторов расчета параметров технологических процессов, позволяет определять технико-экономические показатели работы энергоблока и взаимное влияние параметров оборудования. Анализ этих данных в конкретных условиях эксплуатации позволяет определить наиболее существенные постоянные и переменные параметры и сформировать характеристики прогнозного фона.

Среди критериев, по которым принимается решение о ремонте в связи с техническим состоянием систем и оборудования, важным показателем является влияние на эффективность выработки электрической и тепловой энергии изменения их параметров и отказ оборудования. Определив на основании данных интегральных эксплуатационных характеристик энергоблоков [7] темп снижения (относительно среднего уровня) показателей эффективности функционирования систем и оборудования, можно установить оптимальные сроки службы, спрогнозировать длительность межремонтных периодов и срок экономически обоснованного выведения их в ремонт. При прогнозировании технико-экономического уровня состояния оборудования энергоблоков анализ его поведения в конкретных условиях эксплуатации позволяет выделить наиболее существенные (информативные) постоянные и переменные параметры, сформировать характеристики прогнозного фона и получить, таким образом, достаточный объем диагностических признаков. С помощью эксплуатационных характеристик можно ранжировать параметры по степени их влияния на состояние технических систем и оборудование энергоблоков [1-3, 8].

Процесс автоматизированной диагностики технического состояния оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС, можно представить следующей процедурой:

1. Планирование и организация серии проверок  $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_l\}$ , представляющих собой эксперименты на имитационной модели энергоблока  $A_k, k = \overline{1, l}$  для всего диагностируемого оборудования.

2. Определение в процессе эксплуатации на основе показаний контрольно-измерительных устройств системы тепловой автоматики и измерений энергоблока значения входного влияния  $Y_k, k = \overline{1, l}$ , в виде исходных данных поступающего в имитационную модель энергоблока, и отклика модели на это влияние как значения диагностической функции  $D(W(Y_k))$  (результат проверки). С этой целью предварительно решается задача оптимизации выбора проверок, определяющих техническое состояние оборудования энергоблока: общее количество проверок должно быть минимальным  $\Pi \rightarrow \min$ , а каждая проверка  $\pi_k, k = \overline{1, l}$  должна содержать максимально возможное количество информации  $I_{\pi_k} \rightarrow \max$ .

3. Сопоставление значений диагностических функций  $D(W(Y_k))$ , полученных в результате имитационного эксперимента на имитационной модели энергоблока, с их измеренными и нормативными значениями с целью диагностического вывода о причинах и факторах изменений технического состояния оборудования и определения времени, остающегося до его отказа.

Измерение технологических параметров с помощью контрольно-измерительных приборов в процессе эксплуатации энергоблока осуществляется обычно в условиях различных случайных помех и погрешностей. Учитывая это, результаты измерений многопараметрической диагностической функции  $W$  в фиксированный момент времени  $\tau_j$  на работающем оборудовании можно считать интервальным оцениванием, то есть интервалом между статистиками, содержащими с определенной вероятностью действительное значение  $W$ . Таким образом, измеряемую функцию  $W$  можно считать случайной величиной из выборки измерений  $n$  с неизвестным средним  $\mu$ . В вероятностной теории математической статистики выборка – набор независимых в совокупности одинаково распределенных случайных величин. Однако тщательный анализ большинства реальных практических задач показывает, что известной является не выборка  $W_i^l$ , а величины  $W_i^{l*} = W_i^l + \varepsilon^l$ , где  $\varepsilon^l$  – определенные погрешности измерений, наблюдений, анализа, экспериментов, исследований (например, инструментальные погрешности). Таким образом, важным при построении статистики, на которой базируются статистические выводы и которая применяется для оценивания параметров, характеристик распределения и проверки гипотез, является соблюдение принципа, что известным является значение статистики от переменной  $W_i^{l*}$ , а не  $W_i^l$  [9]. Если погрешности удовлетворяют условию  $\forall l: |\varepsilon^l| \leq \Delta$ , то начальные данные изображаются в виде интервалов  $[W_i^l - \Delta; W_i^l + \Delta]$ , причем ограничение на погрешности можно задавать разными способами – кроме абсолютных применяются относительные, а также другие показатели отличия  $W_i^{l*}$  от  $W_i^l$ .

Применение методов интервальной статистики определяет доверительный интервал для математического ожидания  $\mu$  для заданной доверительной вероятности  $(1 - \alpha)$  так:

$$\left[ \mu - \Delta - u(\alpha - 1) \frac{S}{\sqrt{n}}; \mu + \Delta + u(\alpha - 1) \frac{S}{\sqrt{n}} \right],$$

где  $u(\alpha - 1)$  – квантиль порядка  $\frac{\alpha}{2}$  стандартного нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

То есть, при увеличении объема выборки длина доверительного интервала не может быть меньше  $2\Delta$ . Следует отметить, что важным преимуществом оценки  $\mu$  таким способом не является лишь увеличение интервала и учет, таким образом, погрешностей наблюдений, но и то, что распределения результатов наблюдений во многих практических задачах чаще всего отличаются от нормальных.

В процессе диагностики проводится сравнение осредненного результата измерений диагностической функции  $\bar{W}_{\text{изм}}$  и вычисленного с помощью имитационной модели энергоблока значения этой же функции  $W_{\Sigma}$ , представляющего собой сумму влияний отдельных возможных причин (положительный результат проверки  $\pi_k$ ) в момент времени  $\tau_j$ , соответствующему проведенным измерениям. Для этого применяется статистическая

теория проверки альтернативных гипотез  $\begin{cases} H_0 : W = \bar{W}_{\text{ИЗМ}} \\ H_1 : W_{\Sigma} \neq \bar{W}_{\text{ИЗМ}} \end{cases}$ .

Подход статистики интервальных данных в задаче проверки статистических гипотез позволяет учесть погрешности измерений и заключается в следующем. Выборочное значение статистики применяемого критерия может принимать любое значение в интервале длиной в две нотны (нотна – величина максимально возможного отклонения, вызванного погрешностями наблюдений  $\varepsilon$ :  $N(\varphi(W_i)) = \sup_{\varepsilon} |\varphi(W_i) - \varphi(W_i^*)|$ ,  $\varphi$  – статистика). Если принятие решения основано на критерии Стьюдента, то статистика с учетом зависимости от измеренных  $W_i^*$ , а не от истинных  $W_i$ , равна  $t_0(W^*) = \frac{\sqrt{n}}{\nu}$ , где  $\nu = S(W^*) / |W_{\Sigma}^* - \bar{W}_{\text{ИЗМ}}|$  – выборочный коэффициент вариации. Интервал изменения статистики  $[t_0(W^*) - N_{t_0}(W^*); t_0(W^*) + N_{t_0}(W^*)]$  и нотна для  $t_0$  определяется через нотну для выборочного коэффициента вариации  $N_{t_0}(W^*) = \frac{\sqrt{n}}{\nu^2} N_{\nu}(W^*)$ . Соответственно значение порога  $C$  выбранного критерия, определяющего отклонение или принятие нулевой гипотезы (в классическом случае для критерия Стьюдента величина  $t_{n-1}^{1-\alpha/2}$ ), находится в интервале  $[C - N_{t_0}(W^*); C + N_{t_0}(W^*)]$ , а уровень значимости критерия находится в пределах  $\alpha \in (1 - p(C + N_{t_0}(W^*)); 1 - p(C - N_{t_0}(W^*)))$ . Поэтому, учитывая погрешности измерений, целесообразно заменить  $C$  на  $C + N_{t_0}(W^*)$ . Это гарантирует вероятность отклонения нулевой гипотезы, при условии, что гипотеза верна, не большую  $\alpha$ .

Для определения зависимостей, описывающих изменение технического состояния и надежность работоспособности оборудования, а также времени, оставшегося до его отказа, с целью планирования сроков и длительности ремонтов и вычисления коэффициента готовности энергоблоков предлагается следующий подход.

На прогнозируемом временном интервале эксплуатации энергоблока параметры его оборудования  $X_r, r = \overline{1, m}$  подлежат эволюции в результате изменения технического состояния оборудования. В результате стойкости физико-химических процессов, вызывающих эти изменения, параметры являются непрерывными и монотонными функциями времени  $\tau$ , которые можно считать полумарковскими зависимостями с известными аппроксимациями их реализаций [11].

Эти аппроксимации представляются различными функциями. Для наиболее часто встречающихся в практике эксплуатации оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС, это линейные и экспоненциальные функции [12], которые записываются соответственно, как

$$x_r(\tau) = \alpha_r + \beta_r \cdot \tau \text{ и } x_r(\tau) = c_r \cdot e^{\gamma_r \tau}, \text{ где } r = \overline{1, m}.$$

С началом эксплуатации оборудования в момент времени  $\tau_0 = 0$ , с помощью штатной или специальной системы контрольно-измерительных устройств энергоблока и его имитационной модели предложенным методом осуществляется диагностика технического состояния оборудования во всем временном интервале эксплуатации  $\delta\tau = \tau - \tau_0$  и, таким образом, последовательно наблюдаются реализации функций  $x_r(\tau), r = \overline{1, m}$  до конца прогнозируемого интервала эксплуатации  $\tau$ . По полученным в процессе наблюдений в

точках  $\tau_j, \tau_j \in [\tau_0, \tau]$  дискретным значениям реализаций, выбираются лучшие экстраполяционные кривые  $x_r(\tau), r = \overline{1, m}$ , то есть вычисляются коэффициенты  $\alpha_r, \beta_r$  или  $c_r, \gamma_r$  аппроксимационных зависимостей, причем каждые новые значения наблюдаемых реализаций уточняют кривые прогноза  $x_r(\tau), r = \overline{1, m}$ . Точка пересечения функции  $x_r(\tau), r = \overline{1, m}$ , описывающей изменение технического состояния диагностируемого оборудования, с заданными границами  $g_r, r = \overline{1, m}$ , определяющими предельные значения этой функции, исходя из технико-экономических показателей энергоблока или надежности его работы, интерпретируется как наработка оборудования до отказа. Это позволяет определить время  $\Delta\tau = \tau^* - \tau_j$ , оставшееся до момента необходимого ремонта оборудования (до его отказа)  $\tau^*$  от момента диагностики технического состояния  $\tau_j$ .

Зависимости  $x_r(\tau), r = \overline{1, m}$ , построенные для всей совокупности эксплуатируемого оборудования, составляют базу данных эволюций параметров состояния и надежности оборудования для конкретных типов энергоблоков ТЭС и АЭС и условий их эксплуатации. Такая база может быть применена на разных этапах жизненного цикла энергоблоков, в том числе для планирования длительности ремонтных работ на электростанциях и определения коэффициента использования установленной мощности, коэффициента готовности.

В качестве критерия, по которому проводится планирование продолжительности ремонтных работ, выступают экономические показатели в виде суммарных затрат (потерь) электростанции  $Z_{п.р}$ , связанных с ремонтами энергоблоков [13]:

$$Z_{п.р} = Z_з + Z_п + Z_м + Z_р,$$

где  $Z_з$  – затраты (потери), обусловленные недовыработкой электроэнергии из-за простоя энергоблоков во время ремонтов и зависящие от целого ряда технико-экономических факторов (уровня энергопотребления в энергосистеме во время ремонтов, возможных штрафных санкций за превышение сроков ремонтов и др.);  $Z_п$  – затраты на подготовительные работы, предшествующие ремонту;  $Z_м$  – затраты на ремонтные материалы и запасные части;  $Z_р$  – затраты на непосредственное проведение ремонтных работ.

Продолжительность планируемых ремонтных работ является функцией затрат на них  $\tau_{п.р} = f(Z_{п.р})$  и удовлетворяет соотношению  $\tau_{п.р} \geq \tau_{п.р \min}$ , где  $\tau_{п.р \min}$  – минимально возможная продолжительность ремонта энергоблока.

Время  $\Delta\tau$ , оставшееся до отказа оборудования энергоблока от момента диагностики его технического состояния, и продолжительность планового ремонта  $\tau_{п.р}$  определяют коэффициент готовности энергоблока  $K_r$ , являющийся одним из показателей надежности, по известной формуле:

$$K_r = \frac{\Delta\tau}{\Delta\tau + \tau_{п.р}}.$$

Минимально возможная продолжительность ремонта энергоблока  $\tau_{п.р \min}$  определяется, в основном, исходя из следующих технологических и экономических предпосылок: ремонтные работы не могут быть выполнены быстрее, чем за  $\tau_{п.р \min}$  из-за отсутствия на электростанции соответствующих ремонтных технологий; при  $\tau_{п.р} = \tau_{п.р \min}$  затраты на

непосредственное проведение ремонтных работ  $Z_p$  максимальны; затраты на подготовительные работы, предшествующие ремонту,  $Z_{\text{п}}$  также, как правило, максимальны; потери обусловленные недовыработкой электроэнергии  $Z_{\text{э}}$  минимальны; затраты на ремонтные материалы и запасные части  $Z_m$  не зависят от сроков ремонта.

При увеличении планируемой продолжительности ремонта оборудования  $\tau_{\text{п.р}}$  по сравнению с  $\tau_{\text{п.р.мин}}$  происходит уменьшение коэффициента готовности энергоблока  $\Delta K_r$  в соответствии с зависимостью

$$\Delta K_r = \frac{\Delta\tau(\tau_{\text{п.р}} - \tau_{\text{п.р.мин}})}{(\Delta\tau + \tau_{\text{п.р.мин}})(\Delta\tau + \tau_{\text{п.р}})}$$

По этой причине увеличение продолжительности планируемых ремонтных работ на остановленных энергоблоках электростанций приводит к снижению надежности энергоблоков ТЭС и АЭС по такому показателю как коэффициент готовности  $K_r$ .

### Выводы

Предложенные методы и подходы позволяют повысить адекватность диагностических моделей и могут быть реализованы в специализированных программно-технических средствах, входящих в состав АСУ ТП энергоблоков ТЭС и АЭС, для диагностики технического состояния оборудования, планирования продолжительности ремонтных работ и расчета коэффициентов готовности энергоблоков.

### Список литературы

1. Gardzilewicz A. The heat and flow diagnostic procedure leading to a steam turbine repair Plan / A. Gardzilewicz, A. Jefimow // Proc. 10th Conf. on Steam and Gas Turbines for Power and Cogeneration Plants. – Karlovy Vary (Czech. Rep.). – 1994. – P. 87–93.
2. Gardzilewicz A. Thermal Diagnostics of Thermal Cycle Components on an Example of a Regenerative Heat Exchanger Rep. / A. Gardzilewicz, A. Jefimow // IFFM-PAS 256/94 – Gdansk (in Polish). – 1994. – P. 34–40.
3. Gluch J. The analysis of performance of the turbine condenser with the prognosis of repair / J. Gluch, A. Gardzilewicz // Proc. of the International Joint Power Generation Conf. – Baltimore, Maryland (USA). – August 23–26, 1998. – V. 2. – P. 179–190.
4. Скалозубов В. И. Оптимизация плановых ремонтов энергоблоков атомных электростанций с ВВЭР / В. И. Скалозубов, Ю. Л. Коврижкин, В. Н. Колыханов и др. – Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 496 с.
5. Палагин А. А. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок / А. А. Палагин, А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова. – К.: Нак. думка, 1991. – 201 с.
6. Ефимов А. В. Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Энергетика: економіка, технології, екологія. – НТУУ «КПІ». – 2006. – № 2. – С. 5–9.
7. Potanina T. Problem of optimal load distribution between power units on the power stations / T. Potanina, A. Efimov // MOTROL – Lublin. – 2009. – Vol. 11A. – С. 25–30.
8. Jefimow A. Symulacyjne modelowanie funkcjonowania energobloku elektrowni atomowej z reaktorem WWER-1000 / A. Jefimow, T. Potanina // Nauka i studia – Przemysl. – Nauka i studia. – № 2(14)2009. – P. 59–69.
9. Орлов А. И. Прикладная статистика / А. И. Орлов. – М.: Экзамен, 2004. – 656 с.
10. Монтгомери Д. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 383 с.
11. Ефимов А. В. Оценка эффективности тепловых схем энергоблоков по параметрам состояния и надежности оборудования / А. В. Ефимов, Т. А. Гаркуша // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 1. – С. 103–108.

12. Острейковский В. А. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ / В. А. Острейковский, Н. Л. Сальников. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

13. Ящура А. И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования / А. И. Ящура. – Москва: изд-во НЦ ЭНАС. – 2006. – 504 с.

## APPLICATION OF INTERVAL STATISTICS FOR DIAGNOSTICS OF TECHNICAL STATE OF THE EQUIPMENT AND THE PLANNING DURATION OF REPAIRS OF TURBOSETS OF HEAT POWER PLANT AND NUCLEAR POWER PLANT

A.V. YEFIMOV, Sc. D., hab., Prof., T.V. POTANINA, PhD, V. L. KAVERTSEV, PhD, T.A. GARKUSHA, Sc. res., T.A. YESYPENKO, Sc. res.

*Tasks of optimization of planning and organization of repair works on power units of HPS and NPS and calculation of their coefficients of readiness on the basis of results of diagnostics of the technical state of equipment are one of the most essential and actual problems of energy. The methods of analysis of diagnostic parameters of estimation of the state of equipment of power units of HPS and NPS, based on the methods of statistics of interval data, are offered in the article. Influence of duration of repair works is shown on the coefficient of readiness of power units of HPS and NPS.*

Поступила в редакцию 12.04 2012 г.



**«ТРИСТАР ЭНЕРГИЯ»**

Юридический адрес: 61057, г. Харьков, ул. Сумская, 17, оф.11  
Почтовый адрес: 61057, г. Харьков, а/я 9491  
тел./факс: (057) 700-28-63; 714-94-68  
e-mail: tristar\_2008@mail.ru

ООО «Тристар энергия» является членом Оптового рынка электроэнергии Украины (Лицензия НКРЭ на право осуществления предпринимательской деятельности по поставке электрической энергии по нерегулированному тарифу АВ № 399877 от 28.01 2009г.)

Приоритетным направлением деятельности фирмы является поставка электрической энергии по нерегулируемому тарифу.

ООО "Тристар энергия" предлагает работать на выгодных условиях, в том числе:

- ✓ Экономия средств за счет более низкого тарифа на электроэнергию в расчетном периоде по сравнению с тарифом энергопередающей компании.
- ✓ Гибкий график оплаты за покупаемую Потребителем электроэнергию.
- ✓ Предприятию, которое находится на адресной поставке, энергопередающая компания не имеет законных оснований насчитать штраф за превышение лимита, по установленной техническими условиями, мощности, согласно Постановлению КМ Украины № 1446 от 28 октября 2004г.
- ✓ В течение расчетного месяца потребитель может корректировать заявленный объем электроэнергии, а именно увеличивать объем и тем самым корректировать граничные уровни величин потребляемой мощности.
- ✓ Потребитель имеет возможность обратиться к ООО "Тристар энергия" за помощью в решении вопросов в сфере энергосбережения и энергоаудита.

**Предлагаем Вам на взаимовыгодных условиях совместное сотрудничество для решения задач, программ и проектов в сфере энергосбережения и энергосберегающих технологий.**