

УДК 621.165

Ефимов А.В., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А.

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ,
ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И РАСЧЕТА
КОЭФФИЦИЕНТОВ ГОТОВНОСТИ ЭНЕРГООБЛОКОВ ТЭС И АЭС**

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Среди наиболее важных и актуальных проблем тепловой и атомной энергетики особое место занимают задачи рационального планирования и организации ремонтных работ на энергоблоках электростанций и расчета их коэффициентов готовности на основе результатов диагностики технического состояния оборудования. Решение этих задач в практике эксплуатации энергоблоков ТЭС и АЭС дает возможность 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].

В настоящей статье предложены методы, модели и подходы к решению этих актуальных задач, которые могут быть использованы для разработки специализированных интеллектуальных программно-технических средств, входящих в АСУ ТП энергоблоков ТЭС и АЭС.

Техническое состояние оборудования энергоблока в период эксплуатации определяется значениями ряда диагностических функций $F_i, i = \overline{1, m}$, которые являются мерами качества его функционирования в момент времени $\tau_j, j = \overline{\tau_0, \tau}$. Автоматизированную диагностику технического состояния оборудования энергоблока ТЭС или АЭС можно проводить с помощью математических моделей технологических процессов, протекающих в оборудовании, которые объединены в единую имитационную модель энергоблока, достаточно хорошо описанную в работах [4–6]. Отметим лишь, что единая имитационная модель энергоблока, организованная в виде логико-числовых операторов расчета параметров технологических процессов в его оборудовании, позволяет определять технико-экономические показатели работы энергоблока и взаимное влияние параметров оборудования. При таком подходе процесс автоматизированной диагностики технического состояния оборудования сводится к следующей процедуре:

1. Планирование и организация некоторой серии проверок $\Pi\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\}$, которые представляют собой численные эксперименты на единой имитационной модели энергоблока $A_i, i = \overline{1, m}$ для всего диагностируемого оборудования;

2. Определение во время эксплуатации на основании показаний контрольно-измерительных приборов системы тепловой автоматики и измерений энергоблока значения входного воздействия $Y_i, i = \overline{1, m}$, которое в качестве исходных данных поступает в имитационную модель энергоблока A_i , и отклика модели на это воздействие как зна-

чения диагностической функции F_i (результат проверки). С этой целью предварительно решается задача оптимизации выбора проверок, определяющих техническое состояние оборудования энергоблока, которая состоит в том, чтобы общее количество проверок было минимальным $\Pi \rightarrow \min$, а каждая проверка $\pi_i, i = \overline{1, m}$ включала бы в себя максимально возможное количество информации $I_{\pi_i} \rightarrow \max$. Полное количество информации, содержащей алгоритм проверок Π относительно технических состояний оборудования энергоблока S , равно

$$I_{i \rightarrow S} = I_{\pi_1} + I_{\pi_2/\pi_2} + \dots + I_{\pi_i/\pi_{i-1}} \rightarrow S.$$

3. Сопоставление значений диагностических функций F_i , полученных в результате численного эксперимента на имитационной модели энергоблока, с их измеренными и нормативными значениями с целью диагностического вывода о причинах и факторах изменения технического состояния оборудования и определения времени, оставшегося до его отказа.

В общем случае, при диагностике технического состояния оборудования энергоблока с помощью его имитационной модели в качестве диагностической выступает многопараметрическая функция $F = F(\mathbf{X}(\tau))$, которая характеризует влияние изменения во времени τ вектора параметров оборудования $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, отражающих ухудшение эксплуатационных характеристик в межремонтный период, на эффективность функционирования энергоблока. Имитационная модель энергоблока позволяет получить зависимости, которые прогнозируют влияние изменения каждого из параметров x_i на F во времени τ :

$$F = F_i(x_i(\tau)), i = \overline{1, m}.$$

Поскольку прогнозируемые процессы изменения эксплуатационных характеристик оборудования энергоблока в межремонтный период представляют собой случайные функции времени, для их описания можно применить математический аппарат теории случайных процессов. В этом случае при условии нормального распределения для фиксированного момента времени $\tau = \tau_j, j = \overline{\tau_0, \tau}$, случайный процесс $x_i(\tau)$ превращается в случайную величину $x = x_i(\tau_j)$, которая характеризуется одномерной плотностью вероятностей $f(x)$.

Результатом вероятностного прогнозирования изменения параметров оборудования энергоблока является рассчитанная для него вероятность работоспособного состояния

$$P_{ip}(x_i(\tau_j) < g_i) = \int_{x_{i \min}}^{x_{i \max}} f(x_i, \tau_j) dx, i = \overline{1, m}, j = \overline{\tau_0, \tau},$$

где $f(x_i, \tau_j)$ – известная плотность вероятностей процесса; g_i – гранично допустимое значение x_i .

Единая имитационная модель энергоблока позволяет определить совокупное влияние изменения во времени k параметров оборудования энергоблока на показатели его работы:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k F_i(x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{t_0, \tau}.$$

Вероятность этого влияния составляет

$$P_{F_{\Sigma}} = \prod_{i=1}^k P_{ip}(x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{t_0, \tau}.$$

Измерение технологических параметров с помощью контрольно-измерительных приборов в процессе эксплуатации энергоблока проводится обычно в условиях различных случайных помех и погрешностей. Учитывая это, результаты измерения многопараметрической диагностической функции F в фиксированный момент времени τ_j на действующем оборудовании можно рассматривать как интервальное оценивание, то есть как интервал между статистиками, которые содержат с определенной вероятностью истинное значение F . Таким образом, измеряемую функцию F можно рассматривать как случайную величину из выборки измерений n с неизвестным средним значением μ . Минимальное и максимальное значения функции F в выборке n будут соответственно нижней и верхней границами доверительного интервала $F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$, а величина $(1 - \alpha)$ – доверительной вероятностью. Известно, что в этом случае величина $\left(\bar{F} - \frac{\mu}{S\sqrt{n}}\right)$ подлжит t -распределению Стьюдента с $(n - 1)$ степенями свободы [7]. Здесь \bar{F} – выборочное среднее значение результатов измерений многопараметрической функции F , то есть $F = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n F_r$, а S – выборочная дисперсия

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (F_r - \bar{F})^2.$$

Тогда процентный доверительный интервал для диагностической функции F принимает вид

$$\mu = F \pm t_{n-1}^{\alpha/2} S \sqrt{n},$$

где $t_{n-1}^{\alpha/2}$ – верхняя (критическая) процентная точка t -распределения с $(n - 1)$ степенями свободы, то есть такая, при которой вероятность значений, превышающих $t_{n-1}^{\alpha/2}$, равна $\alpha / 2$.

Это положение используется для построения по результатам измерений целой серии доверительных интервалов диагностической функции F , которые отличаются

один от другого вероятностью нахождения значений этой функции P_F в каждом из интервалов

$$P_F \left(-t_{n-1}^{\alpha/2} \leq \frac{\bar{F} - \mu}{S \sqrt{n}} \leq t_{n-1}^{\alpha/2} \right) = 1 - \alpha .$$

В процессе диагностики проводится сравнение осредненного результата измерений диагностической функции $F_{\text{изм}}$ и значения этой же функции F_{Σ} , рассчитанного с помощью единой имитационной модели энергоблока, представляющего собой сумму влияния отдельных возможных причин (положительный результат проверки π_j) в момент времени τ_j , который соответствует проведенным измерениям. Для этого используется статистическая теория проверки альтернативных гипотез

$$\begin{cases} H_0 : F_{\Sigma} = \bar{F}_{\text{изм}} \\ H_1 : F_{\Sigma} \neq \bar{F}_{\text{изм}} \end{cases} .$$

Гипотеза H_0 отклоняется, если абсолютное значение t -распределения Стьюдента, которое равно $|t_0| = \left| \frac{F_{\Sigma} - \bar{F}_{\text{изм}}}{S \sqrt{n}} \right|$, превышает значение критической процентной точки $t_{n-1}^{\alpha/2}$, то есть если выполняется неравенство $|t_0| > t_{n-1}^{\alpha/2}$. В этом случае в процессе диагностики делается вывод, что $\bar{F}_{\text{изм}} \neq F_{\Sigma}$, а величина $|F_{\Sigma} - \bar{F}_{\text{изм}}| = \delta F$ используется для принятия решения о причинах, которые имели влияние на техническое состояние оборудования. Чем меньше δF , тем больше вероятность того, что именно эти причины изменили состояние оборудования. Более вероятными будут те причины, при которых F_{Σ} попадает в границы доверительного интервала

$$\varepsilon = \pm t_{n-1}^{\alpha/2} S \sqrt{n} ,$$

где вероятность возможной ошибки α минимальна.

Вероятность принятия решения в результате диагностики равна

$$P = (1 - \alpha) \prod_{i=1}^k P_{i_p} (x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{\tau_0, \tau} .$$

При выполнении гипотезы H_0 , то есть в случае, когда $F_{\Sigma} = \bar{F}_{\text{изм}}$, вероятность принятия решения будет максимальной, так как вероятность ошибки $\alpha = 0$, и будет равна

$$P = \prod_{i=1}^k P_{i_p} (x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{\tau_0, \tau} .$$

Описанный метод диагностики технического состояния оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС может быть реализован в виде программного модуля, включающего в себя базу данных. Факторы и причины, которые вызывают изменение технического состояния оборудования, а значит и соответствующие им отклонения диагностических функций, определяются и систематизируются на основе анализа опыта эксплуатации и ремонтов энергоблоков ТЭС и АЭС и заносятся в эту базу данных.

Для определения зависимостей, описывающих изменение технического состояния и надежности работоспособного оборудования, а также времени, оставшегося до его отказа, с целью планирования сроков и продолжительности ремонтов и расчета коэффициентов готовности энергоблоков предлагается следующий подход.

На прогнозируемом временном интервале эксплуатации энергоблока параметры его оборудования $x_i, i = \overline{1, m}$ подвержены эволюции в результате изменения технического состояния оборудования. Вследствие устойчивости физико-химических процессов, вызывающих эти изменения, они представляют собой непрерывные и монотонные функции времени τ , которые можно рассматривать как полумарковские зависимости с известными аппроксимациями их реализаций [8].

Эти аппроксимации могут быть представлены разными видами. Для часто встречающихся в практике эксплуатации оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС линейного и экспоненциального видов [9] они записываются соответственно как

$$\left. \begin{aligned} x_i(\tau) &= c_i + \gamma_i \tau, i = \overline{1, m} \\ x_i(\tau) &= \alpha_i e^{\beta_i \tau}, i = \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Начиная с начала эксплуатации оборудования в момент времени $\tau_0 = 0$, с помощью штатной или специальной системы контрольно-измерительных приборов энергоблока и его имитационной модели описанным выше методом проводится диагностика технического состояния оборудования во всем временном интервале эксплуатации $\delta\tau = \tau - \tau_0$ и таким образом последовательно наблюдаются реализации функций $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$ до конца прогнозируемого интервала эксплуатации τ . По получаемым в процессе наблюдения в точках $\tau_j, j = \overline{\tau_0, \tau}$ дискретным значениям реализаций $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$, учитывая применение полумарковских моделей для описания их эволюций, строятся наилучшие экстраполяционные кривые $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$, то есть находятся коэффициенты c_i, γ_i или α_i, β_i аппроксимационных зависимостей (1), причем каждые новые значения наблюдаемых реализаций уточняют кривые прогноза $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$. Точка пересечения функции $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$, которая описывает изменение технического состояния диагностируемого оборудования, с заданной границей $g_i, i = \overline{1, m}$, определяющей предельное значение этой функции исходя из технико-экономических показателей энергоблока или надежности его работы, интерпретируется как наработка оборудования до отказа. Это позволяет определить время $\Delta\tau = \tau_g - \tau_j$, оставшееся до момента

необходимого ремонта оборудования (до его отказа) τ_g от момента диагностики технического состояния τ_j .

Полученные таким образом аппроксимационные зависимости $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$ для всего перечня эксплуатируемого оборудования составляют базу данных эволюций параметров состояния и надежности оборудования для конкретных типов энергоблоков ТЭС и АЭС и условий их эксплуатации. Эта база данных может быть использована на разных этапах жизненного цикла энергоблоков, в том числе и для планирования продолжительности ремонтных работ на электростанциях и определения коэффициента готовности энергоблоков.

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 [10]:

$$Z_{п.р} = Z_з + Z_п + Z_м + Z_р,$$

где $Z_з$ – затраты (потери), обусловленные невыработкой 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 следующей 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 электростанциях соответствующих ремонтных технологий; при $\tau_{п.р} = \tau_{п.р \min}$ затраты на непосредственное проведение ремонтных работ $Z_р$ максимальны; затраты на подготовительные работы, предшествующие ремонту, $Z_п$ также, как правило, мак-

симальны; потери обусловленные недовыработкой электроэнергии Z_3 минимальны; затраты на ремонтные материалы и запасные части Z_m не зависят от сроков ремонта.

При увеличении планируемой продолжительности ремонта оборудования $\tau_{п,р}$ по сравнению с $\tau_{п,рmin}$ происходит уменьшение коэффициента готовности энергоблока ΔK_r в соответствии с зависимостью

$$\Delta K_r = \frac{\Delta\tau(\tau_{п,р} - \tau_{п,рmin})}{(\Delta\tau + \tau_{п,рmin})(\Delta\tau + \tau_{п,р})}$$

По этой причине увеличение продолжительности планируемых ремонтных работ на остановленных энергоблоках электростанций снижает надежность энергоблоков ТЭС и АЭС по такому показателю как коэффициент готовности K_r .

Таким образом, задача определения оптимальной продолжительности ремонтов энергоблоков является задачей многофакторной оптимизации, которая относится к классу задач невыпуклого программирования и может быть решена одним из достаточно хорошо разработанных для этого класса задач методов [11–13].

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

Литература

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. Палагин А.А. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок / А.А. Палагин, А.В. Ефимов, Е.Д. Меньшикова. – К. : Наук. думка, 1991. – 189 с.
5. 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. – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”. – Київ. – №2 – 2006. – С. 5–9.
6. Jefimow A. Symulacyjne modelowanie funkcjonowania energobloku elektrowni atomowej z reaktorem WWER-1000 / A. Jefimow, T. Potanina // Nauka i studia “Filologiczne nauki Biologiczne nauki Medycyna Techniczne nauki Fizyka Informatyka”. –Przemysl. – Nauka i studia. – №2(14)2009. – P. 59–69.

7. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 383 с.
8. Ефимов А.В. Оценка эффективности тепловых схем энергоблоков по параметрам состояния и надежности оборудования. Интегровані технології та енергозбереження / А.В. Ефимов, Т.А. Гаркуша // – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2006. – № 1. – С. 103–108.
9. Острейковский В.А. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский, Н.Л. Сальников. – М.: Энергоатмиздат, 1990. – 416 с.
10. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования / А.И. Ящура. – Москва: изд-во НЦ ЭНАС. – 2006. – 504 с.
11. Мину М. Математическое программирование: Теория и алгоритмы / М. Мину. – М.: Наука, 1990. – 485 с.
12. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 112 с.
13. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 349 с.

УДК 621.165

Єфімов О.В., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А.

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ УСТАТКУВАННЯ, ПЛАНУВАННЯ
РЕМОНТІВ ТА РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ГОТОВНОСТЕЙ
ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС ТА АЕС**

Серед найбільш важливих та актуальних проблем теплової та атомної енергетики особливе місце займають задачі раціонального планування та організації ремонтних робіт на енергоблоках електростанцій і розрахунку їх коефіцієнтів готовностей на основі результатів діагностики технічного стану устаткування. В статті запропоновані методи, моделі і підходи до вирішення цих актуальних задач, які можуть бути застосовані для розробки спеціалізованих інтелектуальних програмно-технічних засобів, що входять в АСУ ТП енергоблоків ТЕС та АЕС.

Yefimov A., Kavercev V., Garkusha T.

**THE METHODS AND MODELS OF AUTOMATED DIAGNOSTICS
OF THE TECHNICAL STATE OF EQUIPMENT, PROGNOSIS OF REPAIR
AND CALCULATION OF EFFICIENCY FOR TURBOSETS OF HEAT AND
NUCLEAR POWER PLANTS**

The methods and models of automated diagnostics of the technical state of equipment of heat and nuclear turbosets, prognosis of repair and calculation of efficiency are developed. The results can be proved in automated systems of control of technological processes for turbosets of heat and nuclear power plants.