

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ УРОВНЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАЗЛАДКИ В НАБЛЮДАЕМОМ СЛУЧАЙНОМ ПРОЦЕССЕ

А.В. Игитов, О.М. Гулина, Н.Л. Сальников

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Работа посвящена методу анализа аномальных ситуаций в оборудовании при диагностике его состояния. Поставлена задача оптимизации, выбран численный метод оптимизации числа пересечений, составлен алгоритм нахождения оценок параметров модели и разработано программное обеспечение, реализующее этот алгоритм. Программы написаны в среде *Delphi*, визуализация результатов в трехмерном пространстве выполнена в среде *Mathcad*, построена зависимость среднего числа пересечений от S и c .

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее типичных задач при диагностике технического состояния различного оборудования ядерной энергетической установки (ЯЭУ) является задача о раннем распознавании неисправности оборудования на основе анализа изменения контролируемого параметра. Эффективность системы контроля [1] в существенной степени зависит от алгоритма обработки информации о состоянии контролируемого оборудования, получаемой со штатных индикаторов, например, акустических индикаторов течей в парогенераторе. В настоящее время известно много алгоритмов и устройств, их реализующих, для определения характеристик измеряемого случайного процесса. Они позволяют фиксировать наличие или отсутствие стационарности контролируемого технологического процесса оборудования ЯЭУ как случайного процесса. При этом, как правило, отслеживается одна из характеристик распределения амплитуды, например, математическое ожидание или дисперсия, или одновременно и та, и другая. Существенными недостатками этих алгоритмов и устройств являются их низкое быстродействие (особенно для низкочастотных процессов, наиболее характерных для технологического оборудования ЯЭУ), большая погрешность идентификации при малом интервале наблюдений, а также невозможность идентификации по всевозможным характеристикам случайного процесса одновременно.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для получения максимально достоверного решения о наличии разладки процесса предлагается анализировать не сам исходный случайный низкочастотный процесс ξ_t , а функцию от него [1, 2]:

© А.В. Игитов, О.М. Гулина, Н.Л. Сальников, 2009

$$\eta_t = \sqrt{\xi_t^{2n} + (c_1 \xi_t^{(1)})^{2n} + \dots + (c_m \xi_t^{(m)})^{2n}}, \quad (1)$$

где $\xi_t^{(j)}$ – j -ая производная процесса ξ_t , c_j – весовые коэффициенты. После чего можно подсчитать число пересечений процессом η_t постоянного уровня S на скользком интервале времени $\tau_{\text{СК}}$.

Вид функции (1) выбран так, чтобы амплитуда обобщенного процесса η_t и его спектральный состав реагировали на изменение всех вероятностных характеристик (математического ожидания, дисперсии, корреляционной функции и т.д.) входного случайного процесса ξ_t с максимально возможной чувствительностью. Реализованное на этом принципе устройство можно настроить таким образом (изменяя коэффициенты c_j и уровень S), чтобы оно было нечувствительным, например, к увеличению уровня шума, но при этом хорошо улавливало изменение частотного состава измеряемого сигнала ξ_t [1,2].

Математическое ожидание числа пересечений $N_{\tau_{\text{СК}}}$ уровня S можно определить по формуле

$$MN_{\tau_{\text{СК}}} = \tau_{\text{СК}} \int_{-\infty}^{\infty} |\eta'_t| f(S, \eta'_t) d\eta'_t \rightarrow \max_{S, c_j}, \quad (2)$$

где $f(x, y)$ – совместная плотность распределения η_t и η'_t , вывод которой приведен в [2]. Значения c_j и S рассчитываются из условия максимизации числа пересечений уровня до момента разладки с целью получения представительной статистики на как можно меньшем интервале времени.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Метод, представленный в работе [3], позволил приближенно рассчитать значение оптимального уровня S с учетом следующих предположений. Для стационарного гауссовского процесса ξ_t с нулевым математическим ожиданием в формуле (2) в качестве функции η_t принята огибающая первого рода, ограниченная только первой производной процесса ξ_t :

$$\eta_t = \sqrt{\xi_t^2 + (c \xi_t^{(1)})^2}. \quad (3)$$

Целью настоящей работы является постановка задачи оптимизации и получение соответствующих оценок для уровня S и весового коэффициента c .

В отличие от метода, изложенного в [2], в данной работе проведен точный аналитический расчет числа пересечений для нахождения оптимального уровня, основанный на переходе в другую систему координат и применении математических преобразований совместной плотности распределения огибающей первого рода и ее производной [4].

Найдем совместную плотность распределения $f_{\eta_t, \eta'_t}(s, v)$ из формулы для совместной вероятности распределения

$$F_{\eta_t, \eta'_t}(S, v) = P(\eta_t < S; \eta'_t < v) = \iiint_{A_{s,v}} f_{\xi_t, \xi_t^{(1)}, \xi_t^{(2)}}(x_0, x_1, x_2) dx_0 dx_1 dx_2, \quad (4)$$

где $A_{s,v} = \left\{ (x_0, x_1, x_2) : \sqrt{x_0^2 + c^2 x_1^2} < S; \frac{x_0 x_1 + c^2 x_1 x_2}{\sqrt{x_0^2 + c^2 x_1^2}} < v \right\}$, ξ_0 соответствует x_0 ,

$$\xi_1 - x_1, \xi_2 - x_2, \eta_t = \sqrt{\xi_t^2 + (c \xi_t^{(1)})^2}, \eta'_t = \frac{\xi_t \xi_t^{(1)} + c^2 \xi_t^{(1)} \xi_t^{(2)}}{\sqrt{\xi_t^2 + (c \xi_t^{(1)})^2}}.$$

Сделаем замену переменных

$$\begin{cases} x_0 = c\rho \cos \varphi, \\ x_1 = \rho \sin \varphi, \\ x_2 = x_2, \end{cases} \quad (5)$$

где $\rho \in \left[0; \frac{S}{c}\right]$, $\varphi \in [0; 2\pi]$, $x_2 < \left(\frac{v}{\sin \varphi} - \rho \cos \varphi\right) \frac{1}{c}$ при $\varphi \in [0; \pi]$

и $x_2 > \left(\frac{v}{\sin \varphi} - \rho \cos \varphi\right) \frac{1}{c}$ при $\varphi \in [\pi; 2\pi]$.

$$\text{Якобиан перехода } I = \begin{vmatrix} c \cos \varphi & -c \rho \sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \rho \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = c\rho.$$

Тогда в новых переменных получим

$$\begin{aligned} F_{\eta_t, \eta_t'}(S, v) = & \int_0^{\frac{S}{c}} \int_0^{\left(\frac{v}{\sin \varphi} - \rho \cos \varphi\right) \frac{1}{c}} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\xi_t, \xi_t', \xi_t''}(c\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, x_2) \times \\ & \times c\rho dx_2 d\rho d\varphi + \int_{\pi}^{2\pi} \int_0^{\frac{S}{c}} \int_{\left(\frac{v}{\sin \varphi} - \rho \cos \varphi\right) \frac{1}{c}}^{\infty} f_{\xi_t, \xi_t', \xi_t''}(c\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, x_2) \times \\ & \times c\rho dx_2 d\rho d\varphi. \end{aligned}$$

Учитывая проведенные преобразования, получим выражение для среднего числа пересечений

$$\begin{aligned} \frac{MN_{\tau_{\text{ск}}}}{\tau_{\text{ск}}} = & \frac{2S\sqrt{2a_0}}{\sqrt{\pi^3 a_4}} \exp\left\{-\frac{a_3 S^2}{2a_0 c^2}\right\} \left[I \left(1 - \frac{\frac{\sqrt{\pi} \left(\frac{a_4}{c^2} - a_2 \right)^2}{2}}{a_2^2 + a_4 \left(\frac{a_3}{c^2} - a_1 \right)} \right) + \right. \\ & + \left. \frac{\sqrt{\pi a_0 a_4} \left(\frac{a_4}{c^2} - a_2 \right)}{\left[a_2^2 + a_4 \left(\frac{a_3}{c^2} - a_1 \right) \right] S} \operatorname{erf} \left\{ \frac{\frac{a_4}{c^2} - a_2}{\sqrt{2a_0 a_4}} S \right\} \exp \left\{ \frac{a_2^2 + a_4 \left(\frac{a_3}{c^2} - a_1 \right)}{2a_0 a_4} S^2 \right\} \right], \quad (6) \\ I = & \int_0^1 \exp \left\{ -\frac{\frac{a_3 + 2a_2}{c^2} - a_1 - \frac{a_4}{c^4}}{2a_0} S^2 u^2 \right\} du. \end{aligned}$$

При решении исследовательских задач, связанных с поиском рационального сочетания сразу нескольких параметров, таких как S и c , трудно спланировать и обработать численный эксперимент с большим количеством варьируемых факторов. В этом случае эффективным средством является многопараметрическая оптимизация, когда поиск рационального сочетания варьируемых факторов возлагается на формальную процедуру нелинейного программирования, а исследова-

телю остается только грамотно сформулировать задачу оптимального поиска и проанализировать полученное решение.

Для проверки нахождения оптимума числа пересечений зафиксируем переменную c и рассмотрим целевую функцию из выражения (6) как функцию одной переменной S . Для максимизации данной функции применен один из методов активного (последовательного) поиска решения – *метод золотого сечения*. Составлен алгоритм поиска, написана реализующая его программа. Алгоритм использован для оптимизации длины шага в методе покоординатного спуска.

Для решения задачи оптимизации целевой функции (4) как функции двух переменных – уровня S и параметра модели c – были рассмотрены численные методы безусловной оптимизации нулевого порядка. Использование этих методов в общем случае позволяет определить точки локального минимума и максимума функции.

Если задача оптимизации какого-либо процесса может быть сформулирована как двумерная (число независимых переменных равно двум), то для ее решения целесообразно использовать аппарат сканирования. Возможность наглядного графического отображения целевой функции и ограничений сразу от двух аргументов помогает лучше осмыслить количественные закономерности происходящих процессов и принять оптимальное решение.

В среде программирования *Mathcad* построены трехмерные графики зависимости среднего числа пересечений N от уровня S и параметра c при фиксированных значениях дисперсий D_1, D_2, D_3 , один из которых представлен на рис. 1.

Результаты моделирования, представленные в виде 3D-графика, показывают, что при определенном сочетании значений дисперсий D_1, D_2, D_3 глобальный максимум существует.

Для нахождения численных значений уровня S и весового коэффициента c разработан набор программ в среде Delphi. Следует отметить, что параметр c не имеет физического смысла, его область определения – вся числовая ось. В отличие от него параметр уровня S измеряется в тех же величинах, что и наблюдаемый процесс, поэтому может быть ограничен областью значений самого процесса. Начальные значения параметров в методах поиска оптимальных значений выбираются исходя из физики измеряемого процесса и области его значений.

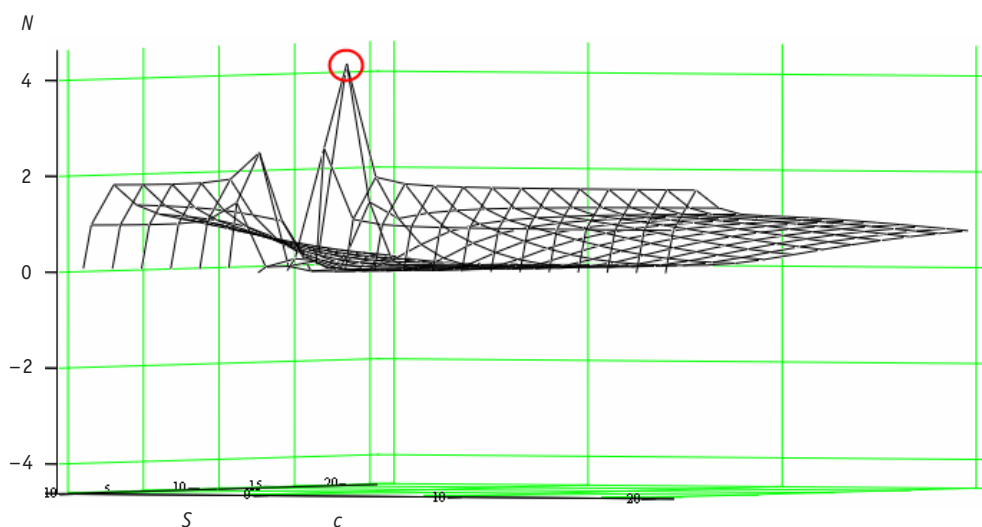


Рис. 1. Графическое отображение целевой функции

Таким образом, в работе

- поставлена задача оптимизации уровня для обнаружения разладки;
- предложен метод нахождения совместной плотности распределения огибающей первого рода и ее производной;
- впервые аналитически получено выражение для математического ожидания числа пересечений для первой производной измеряемого случайного процесса ξ_t ;
- предложены алгоритмы нахождения оценок S и c методом золотого сечения (для оптимизации длины шага) и методами оптимизации нулевого порядка;
- построен трехмерный график зависимости среднего числа пересечений от S и c .

Литература

1. Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
2. Козин И.О., Островский Е.И., Сальников Н.Л. Анализатор момента изменения характеристик случайных низкочастотных процессов. Свидетельство №1322330.
3. Тихонов В.И., Хименко В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
4. Игитов А.В., Гулина О.М., Сальников Н.Л., Чепурко В.А. Проблема повышения эффективности распознавания низкочастотного сигнала // Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем. Сборник научных трудов №18 каф. АСУ/Под ред. А.В. Антонова. – Обнинск: ИАТЭ, 2008. – С. 22-29.

Поступила в редакцию 7.11.2008

Are developed methodical, algorithmic and the software of calculation of speed propagation of waves of pressure (SPWP) in the coolant of reactor core of boiling reactors. Results of calculation of SPWP in technological channels of reactor RBMK-1000 in various modes of operation are resulted.

УДК 621.039.58

The results of the Development of the Experts Questioning Methods and based on them the Estimation of the NPP Staff Reliability Indices \Yu. V. Volkov, D. S. Samokhin, A. V. Sobolev, M. Y. Kanishev, S. L. Lichakov, S. N. Slinev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 6 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.

The paper deals with the methods for estimation the NPP staff reliability indices based on the experts questioning data. Four types of staff errors have been chosen and possibility of the estimation of the given errors frequency has been considered. The results of the opinions two different experts groups are presented and the analysis on the coincidence of these results has been made. The results of the data comparison of the experts questioning and the results of the data processing for the NPP incidents have been made. The recommendations how to use the drawn conclusions to estimate the efficiency of NPP engineers safety activities are given.

УДК 621.039.58

The problem of Level Optimization for Disorder Detection in Observed Random Process \A. V. Igitov, O. M. Gulina, N. L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.

The equipment state diagnostics connects with detection of irregular situations in its operation. There is formulated optimization problem for level intersection number, suggested the calculation method for optimization problem solving. There is performed also the algorithm of model parameters asymptotical estimation and developed the applied soft. Calculations are performed and nomographs are pictured by means of Delphi and Mathcad technologies.

УДК 621.039.52.034.3: 532.546

Geometrical and Hydrodynamic Features of the Radial Coolant Distribution HTGR \V. A. Klimova, V. M. Pahaluev, S. Ye. Sheklein; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The pebble bed reactor core with radial gas flow geometric parameters depending on the demanded energy and construction characteristics analysis results are given. The comparison with the reactor with axial gas flow is carried out. The experimental hydraulic resistance coefficients ratio received contains the dependency on the reactor core inner and outer radius, besides Reynolds number and pebble bed diameter, and can be recommended for the reactor pressure loss calculations for considerable pebble bed thickness. A significant difference of such flows from the cases of flat gas flows in pebble bed is the decrease of the flow pressure pulsations rate from the periphery to the centre.

УДК 621.039.547.5

Features of Resonant Absorption of Neutrons in Thorium Containing Multiply Systems, Caused by Change in Ratio of Moderator Volume and Fuel Volume \I. V. Shamanin, A. V. Godovich, P. A. Seleznev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 14 titles.

The results of numerical experiments defining borders of area of values of ratio V_{mod}/V_f (volume of moderator/volume of fuel) in which anomaly during dependence of resonant absorption is observed are resulted. Its existence proves physical advantages Th^{232} in comparison with U^{238} in case of use as a reproducing material in structure of nuclear fuel at the certain values of ratio V_{mod}/V_f .