

КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРУКТУР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Н.Л. Сальников

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



При построении измерительных систем высокой надежности применяются методы структурной избыточности. Для оценки эффективности таких структур разработан критерий, позволяющий сравнивать различные системы. Путем подбора стохастических характеристик датчиков избыточной системы, удовлетворяющих критерию, можно априори спроектировать более точную систему.

Ключевые слова: ядерные установки, контроль температуры, структурная избыточность, погрешность.

Key words: nuclear plants, control of temperature, superfluous structure, error.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль температурных режимов работы ядерных установок (ЯУ) играет важную роль в обеспечении безопасности их функционирования. Поэтому к достоверности первичной информации о тепловом поле объекта, поступающей с различных датчиков, предъявляются высокие требования, а разработка методов оценки характеристик метрологической надежности этих датчиков представляется весьма значимой задачей.

Источниками термометрической информации в ЯУ являются, в основном, контактные датчики температуры, среди которых наиболее широкое распространение получили термоэлектрические преобразователи (ТЭП) и термопреобразователи сопротивления (ТПС).

Основным показателем, характеризующим работоспособность датчиков, является погрешность показаний, т.е. отклонение полученных данных от истинного значения температуры в исследуемой точке. Если в качестве метрологического отказа принять выход погрешности ξ_t за границы установленного значения, то вероятностью безотказной работы будет вероятность невыхода процесса ξ_t из допустимой области $[0, d]$ на интервале времени $[0, T]$ при условии, что в начальный момент $\xi_0 = x$, $|x| \leq d$ [1]:

$$P(t) = 1 - P(\max_{0 \leq t \leq T} |\xi_t| \geq d | \xi_0 = x).$$

Одним из возможных путей повышения точности измерений температуры является построение такой структуры измерительного комплекса, которая обеспечит повышенную надежность измерений, например, объединение двух или более датчиков в одну измерительную систему с целью получения избыточности пока-

заний в контролируемой точке. Тогда возникает задача оценки эффективности таких систем, состоящих из различных датчиков.

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ

Рассмотрим два возможных варианта системы. В первой системе объединены два датчика температуры различных типов (ТЭП и ТПС), во второй – два однотипных датчика, например, два ТЭП.

Показания каждого из датчиков представляют собой в общем случае (рис.1) сумму неизвестного истинного значения температуры T_t^0 в точке v , где производится измерение температуры (полезного сигнала) и погрешности измерения:

$$x(t) = T_t^0 + \xi_t = T_t^0 + a_\xi(t) + \delta_\xi(t),$$

$$y(t) = T_t^0 + \eta_t = T_t^0 + a_\eta(t) + \delta_\eta(t),$$

$$x_1(t) = T_t^0 + \xi_1(t) = T_t^0 + a_{\xi_1}(t) + \delta_{\xi_1}(t),$$

где $a_\xi(t) = M\xi_t$, $a_\eta(t) = M\eta_t$, $a_{\xi_1}(t) = M\xi_1(t)$ – систематические и $\delta_\xi(t)$, $\delta_\eta(t)$, $\delta_{\xi_1}(t)$ – случайные составляющие погрешностей.

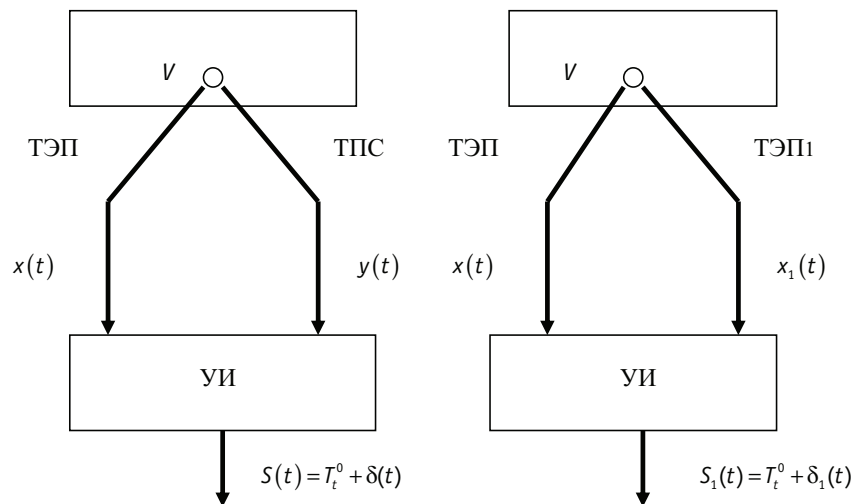


Рис. 1. Схема измерения температуры различными датчиками

Сигналы с первичных преобразователей поступают в устройство обработки информации (УИ), где из измеренных значений температуры $x(t)$, $y(t)$ и $x_1(t)$ вычитаются систематические погрешности и в качестве оценки T_t^0 (наиболее вероятного значения температуры) формируются весовые суммы

$$S(t) = k_\xi(t)x_t^0 + k_\eta(t)y_t^0 = T_t^0 + \delta(t),$$

$$S_1(t) = l_\xi(t)x_t^0 + l_{\xi_1}(t)x_1^0(t) = T_t^0 + \delta_1(t),$$

где $x_t^0 = x_t - a_\xi(t)$; $y_t^0 = y_t - a_\eta(t)$; $x_1^0(t) = x_1(t) - a_{\xi_1}(t)$; $k_\xi(t) + k_\eta(t) = 1$;
 $l_\xi(t) + l_{\xi_1}(t) = 1$.

Коэффициенты в суммах $S(t)$ и $S_1(t)$ берутся такими, чтобы дисперсии $D_{\delta(t)}$ и $D_{\delta_1(t)}$ были минимальными. Это достигается, когда [2]

$$k_{\xi}(t) = \frac{[\sigma_{\xi}^2(t)]^{-1}}{[\sigma_{\xi}^2(t)]^{-1} + [\sigma_{\eta}^2(t)]^{-1}}; \quad k_{\eta}(t) = \frac{[\sigma_{\eta}^2(t)]^{-1}}{[\sigma_{\xi}^2(t)]^{-1} + [\sigma_{\eta}^2(t)]^{-1}};$$

$$l_{\xi}(t) = \frac{[\sigma_{\xi}^2(t)]^{-1}}{[\sigma_{\xi}^2(t)]^{-1} + [\sigma_{\xi_1}^2(t)]^{-1}}; \quad l_{\xi_1}(t) = \frac{[\sigma_{\xi_1}^2(t)]^{-1}}{[\sigma_{\xi}^2(t)]^{-1} + [\sigma_{\xi_1}^2(t)]^{-1}},$$

где $\sigma_{\xi}^2(t) = D\xi(t)$; $\sigma_{\eta}^2(t) = D\eta(t)$; $\sigma_{\xi_1}^2(t) = D\xi_1(t)$.

Нетрудно видеть, что весовые коэффициенты сигналов обратно пропорциональны дисперсиям соответствующих погрешностей, т.е. сигналы с меньшими дисперсиями вносят больший вклад в формирование результирующих сумм $S(t)$ и $S_1(t)$, чем сигналы с большими дисперсиями.

Исследования физических процессов, протекающих в первичных преобразователях и вызывающих недостоверность показаний, не выявили какие-либо общие деградационные механизмы, которые могли бы в равной степени влиять на погрешности датчиков, работающих на разных принципах.

Если же рассматривать датчики одного типа, то их метрологические отказы, как правило, происходят по одним и тем же общим причинам. Это позволяет говорить о независимости отказов ТЭП и ТПС, поэтому предполагается независимость случайных процессов изменения погрешностей. В случае же однотипных датчиков общность причин, приводящих к отказам, дает основание предполагать наличие некоторой корреляционной зависимости между показаниями двух датчиков. Это выражается в том, что в каждый момент времени t

$$\exists COV(x(t), x_1(t)) = COV(\xi(t), \xi_1(t)),$$

причем из естественных соображений эта ковариация неотрицательна.

Таким образом, для дисперсий погрешностей весовых сумм получаем следующие выражения:

$$D\delta(t) = k_{\xi}^2(t)\sigma_{\xi}^2(t) + k_{\eta}^2(t)\sigma_{\eta}^2(t) = \frac{B}{1+B}\sigma_{\xi}^2(t);$$

$$D\delta_1(t) = l_{\xi}^2(t)\sigma_{\xi}^2(t) + l_{\xi_1}^2(t)\sigma_{\xi_1}^2(t) + 2l_{\xi}(t)l_{\xi_1}(t)COV(\xi(t), \xi_1(t)) =$$

$$= \frac{A}{(A+1)^2}(1 + A + 2r\sqrt{A})\sigma_{\xi_1}^2(t),$$

где $A = A_t = \frac{\sigma_{\xi_1}^2(t)}{\sigma_{\xi}^2(t)}$; $B = B_t = \frac{\sigma_{\eta}^2(t)}{\sigma_{\xi}^2(t)}$; $r = r_t = \frac{COV(\xi(t), \xi_1(t))}{\sigma_{\xi}(t)\sigma_{\xi_1}(t)}$ – коэффициент корреляции.

Нетрудно видеть, что если

$$r \geq \frac{(B-A)(A+1)}{2\sqrt{A(A+1)}}, \quad (1)$$

то $D\delta_1(t) \geq D\delta(t)$.

А поскольку распределение погрешностей датчиков близко к нормальному, то из (1) следует

$$P(|\delta(t)| \leq d) \geq P(|\delta_1(t)| \leq d),$$

что означает более высокую достоверность выходного сигнала $S(t)$ системы ТЭП-ТПС.

Очевидно, что если условие (1) выполняется для $\forall t \in [0, T]$, то вероятность безотказной работы системы «ТЭП-ТПС» будет выше вероятности безотказной работы системы «ТЭП-ТЭП» (или ТПС-ТПС1):

$$P(T, d) = P(\max_{t \in [0, T]} |\delta(t)| \leq d) \geq P(\max_{t \in [0, T]} |\delta_1(t)| \leq d) = P_1(T, d).$$

Заметим, что если в (1) положить $A=B$, т.е. $\frac{\sigma_{\xi_1}(t)}{\sigma_{\xi}(t)} = \frac{\sigma_{\eta}(t)}{\sigma_{\xi}(t)}$, то данное условие

примет вид $r_t \geq 0$ и, следовательно, $P(T, d)$ будет заведомо больше $P_1(T, d)$. Таким образом, при соответствующем подборе статистических характеристик погрешностей датчиков избыточные измерения температуры в заданной точке с помощью системы ТЭП-ТПС гарантируют более высокую точность и достоверность по сравнению с измерениями, выполненными группой датчиков одного типа.

Поскольку процессы изменения погрешностей датчиков носят деградационный характер, при их математическом моделировании во многих случаях весьма эффективно применение аппарата марковских непрерывных (диффузионных) процессов. Очевидно, что если погрешности датчиков моделируются диффузионными процессами, то и весовые суммы погрешностей $\delta(t)$ и $\delta_1(t)$ можно описать некоторыми стохастическими дифференциалами. Тогда задача определения вероятности безотказной работы исследуемых систем сводится к определению вероятностей невыхода траекторий диффузионных процессов $\delta(t)$ и $\delta_1(t)$ за допустимый уровень.

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ

Проведем оценку метрологической надежности приведенных выше (рис.1) измерительных систем по эксплуатационным данным об изменении во времени погрешностей хромель-алюмелевых термопар и термометров сопротивления, установленных в термометрической решетке ЯУ и работающих в диапазоне температур 500–600°C. Значения погрешностей определялись путем сравнения показаний исследуемых датчиков с показаниями платино-родиевого термоэлектрического преобразователя, которые принимались за точные значения температуры. Стохастические дифференциалы определены на основании функционалов Бакстера и Гирсанова [1]:

$$d\xi_t = -0,184 \cdot 10^{-3} \xi_t + 0,344 \cdot 10^{-3} t dW_t, \quad \xi(0) = 1,$$

$$d\eta_t = -0,150 \cdot 10^{-3} \eta_t dt + 0,137 dW_t, \quad \eta(0) = 14,$$

$$d\xi_1(t) = -0,162 \cdot 10^{-3} \xi_1(t) dt + 0,375 \cdot 10^{-3} dW_t, \quad \xi_1(0) = -2,$$

где время t измеряется в часах, значения погрешностей – в °C.

Из этих уравнений находим в явном виде [3] зависимости математических ожиданий и дисперсий погрешностей во времени:

$$a_{\xi}(t) = \exp[-0,184 \cdot 10^{-3} t];$$

$$\sigma_{\xi}^2(t) = 0,118 \cdot 10^{-6} \exp[-0,368 \cdot 10^{-3} t] \cdot \int_0^t s^2 \exp[0,368 \cdot 10^{-3} s] ds;$$

$$a_{\eta}(t) = 14,0 \cdot \exp[-0,150 \cdot 10^{-3} t]; \quad \sigma_{\eta}^2(t) = -63,3 \cdot \{\exp[-0,3 \cdot 10^{-3} t] - 1\};$$

$$a_{\xi_1}(t) = -2,0 \cdot \exp[-0,162 \cdot 10^{-3} t];$$

$$\sigma_{\xi_1}^2(t) = 0,141 \cdot 10^{-6} \cdot \exp[-0,324 \cdot 10^{-3} t] \cdot \int_0^t s^2 \exp[0,324 \cdot 10^{-3} s] ds.$$

Далее получаем дискретные реализации процессов $\delta(t)$ и $\delta_1(t)$. Их стохастические дифференциалы имеют вид

$$d\delta(t) = 0,216 \cdot 10^{-3} t dW_t, \quad \delta(0) = 0,0;$$

$$d\delta_1(t) = 0,258 \cdot 10^{-3} t dW_t, \quad \delta_1(0) = 0,0.$$

Численное решение уравнений для определения вероятностей безотказной работы $P(T, d)$ и $P_1(T, d)$ приведено на рис. 2.

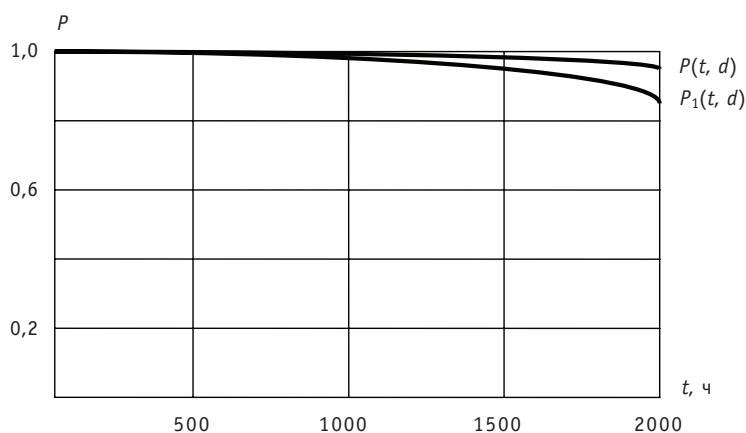


Рис. 2. Вероятности безотказной работы $P(t, d)$ и $P_1(t, d)$

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Для разработки измерительных комплексов повышенной надежности, которые лежат в основе управляющих систем ЯУ, требуется создание формального математического аппарата оценки эффективности различных структур комплексов. Предложенный в данной работе критерий позволяет путем подбора соответствующих статистических характеристик первичных датчиков оценивать такие структуры.

Например, формальный критерий (1) позволяет проводить сравнение систем измерения температуры (или других измерительных систем) со структурной избыточностью для повышения точности показаний.

Литература

1. Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ – М.: Энергоатомиздат. 1990. – 416 с.
2. Иордан Г.Г., Батова Г.П. Адаптивное устройство обработки избыточной информации/В сб. «Приборостроение и автоматический контроль». – М.: Машиностроение, 1978. – С. 254-260.
3. Тихонов В.П., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.

Поступила в редакцию 16.02.2012

Mathematical model of linear stochastic filter is developed for NPP equipment under ageing. Theory of martingales usage is substantiated to predict the technical state of equipment. Also there is formulated optimum principle for choice of preventive actions to decrease damage processes rate.

УДК 621.039.58

Prediction of NPP Equipment Lifetime under Flow-Accelerated Corrosion by Using of Empirical Model \O.M. Gulina, O.O. Frolova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 3 tables. – References, 8 titles.

To predict equipment lifetime under flow-accelerated corrosion there is used Chexal-Horowitz empirical model, realized as ECW-02. One of the most important parameters is Keller coefficient of pipe geometry. To adapt Chexal model to Russian NPP units there is developed procedure of Keller coefficient estimation by using of control data and ECW-02 prediction. As result, stochastic characteristics of Keller coefficients are obtained. To estimate the error connected with admixture content in metal on erosion-corrosion wear rate there is performed comparison of wear rate calculated by using of Durex equation and the one predicted by ECW-02.

УДК 621.039.58

Efficiency Criteria for High Reliability Measured Systems Structures \N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.

To develop high reliability measured systems usually there are used procedures of structural redundancy. To estimate efficiency of such structures there is developed criteria to compare different systems. So it is possible to develop more exact system by inspection of redundant system data unit stochastic characteristics in according with developed criteria.

УДК 504.064.36: 574

Application of the Method of Electrophysical Impact on the Disperse Medium in High-Performance Filtering Gases Devices from Aerosols of Various Origin \I.V. Yagodkin, A.M. Posagennikov, A.G. Grishin, V.P. Melnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 3 titles.

Cleaning of gas-air flows in different branches of industry remains one of the most important directions in the field of technologies of environmental protection from aerosols of the different origin, including radioactive and toxic ones.

High-efficient aerosol filters being used today at NPP are the source of large volumes of radioactive waste subject to burial. They have a limited lifetime, and their fabrication and operation are costly.

The situation arisen with gas cleaning from radioactive and toxic aerosol particles at NPP requires, on the one hand, updating of traditional approaches and, on the other hand, development of fundamentally new methods and aids of air cleaning, namely, the principle of combined cleaning based on the fact that particles take up specific properties in ionized gas and then are to be caught on filters.

The problems of experimental investigation of the effect of intensive aeronization on catching of aerosol particles from the air flow using combined filtering systems is the subject of this paper.

УДК 621.039.534

Experimental Study of Flow Hydrodynamics Lead Coolant and Water through the Experimental Section «Throttle Clearance-Ring» \A.V. Beznosov, M.A. Antonenkov, T.A. Bokova, M.V. Yarmonov, K.A. Makhov, A.A. Molodtsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 2 titles.

A research and comparison of the hydraulic characteristics of the water and lead coolant ($T = 400\text{--}500^\circ\text{C}$) flow in the system of local hydraulic resistances «throttle-annular gap» have been done at the Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University. During the experiments the magnitude of the relative clearance ($2\Delta/d = 0,018; 0,036; 0,056$) was varied with the static and rotated shaft. The average speed inside the annular gap ranged between 0,01 and 0,1 m/sec, the coolant was saturated with the oxygen.