

1. Лыков, А. В. Теплообмен: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1972.
2. Расчеты процессов литья / Р. И. Есьман [и др.] – Минск: Вышэйш. шк., 1977. – 264 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т  
УДК 62-503.5

Поступила 04.10.2012

## **МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Канд. техн. наук ЯНИЦКИЙ В. А.**

*РУП «БЕЛТЭИ»*

Одной из важных задач, решаемых при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), является обеспечение оперативного персонала достоверной и полной информацией о работе и техническом состоянии контролируемого оборудования. В современных системах контроля работы энергогенерирующих установок в зависимости от особенностей используемой технологической схемы 25–35 % поступающих на автоматическую обработку сигналов есть сумма полезного сигнала и случайной помехи, сопоставимой по величине с полезным сигналом. Если по условиям решаемой задачи допускается усреднение поступающих сигналов, влияние случайных помех может быть минимизировано этим несложным способом. Если условия решаемой задачи требуют минимальных задержек при обнаружении изменений контролируемого параметра, необходимо применять цифровые фильтры поступающих сигналов. Впервые применение цифровых фильтров для обработки поступающих сигналов предложено академиком А. Н. Колмогоровым [1]. Метод фильтрации сигналов, предложенный им, впоследствии был усовершенствован Н. Винером [2]. Область применения разработанного метода ограничивается стационарными случайными процессами на входе фильтра. Метод, позволяющий фильтровать сигналы при нестационарных процессах на входе фильтра, разработан Р. Калманом и Р. Бьюси [3].

Перечисленные выше методы не учитывают особенности их применения в системах контроля работы энергетического оборудования, в которых наиболее важные функции управления выполняются оперативным персоналом. Главным требованием для этих систем управления является необходимость минимизации стоимости ошибок при оценке изменений поступившего сигнала – ответа на вопрос: произошло ли изменение поступившего на контроль сигнала вследствие изменения полезного сигнала или это изменение вызвано влиянием случайных помех?

Широкое применение при решении различных задач получили методы, основанные на преобразовании поступающих сигналов из временной области в отображающую область, например в частотную, с использованием преобразования Фурье [4]. Решение сначала находят в отображающей области и после обратного преобразования – во временной. Обычно требуемые характеристики сигналов на выходе фильтра определяются в результате предварительных исследований. Задача контроля работы оборудования

отличается тем, что из поступившего сигнала, который есть сумма полезного сигнала и случайной помехи, необходимо с максимальной достоверностью выделить изменения полезного сигнала и не учитывать изменения, связанные с изменениями случайных помех. Следовательно, для решения задачи контроля работы оборудования требуется выработать оптимальное правило отнесения поступившего сигнала к области изменения полезного сигнала или к области отсутствия его изменений. Для этого требуется использование элементов математической статистики, в частности элементов теории проверки статистических гипотез, позволяющих выработать оптимальное правило классификации поступающих сигналов.

Основные положения разработанного метода изложены в [5, 6]. При решении задачи в качестве критерия оптимизации используется условие минимизации среднего риска по Байесу, что позволяет учесть основные особенности задачи контроля оборудования: неодинаковой стоимости ошибок 1-го рода – «пропуск цели» и ошибок 2-го рода – «ложная тревога», а также учитывать влияние на эффективность работы системы контроля вероятности появления нарушений работы оборудования и их отсутствия.

Согласно разработанной методике, в качестве оператора, преобразующего поступающие сигналы, используется фильтр экспоненциального сглаживания [7]. При дискретном опросе датчиков информации оператор имеет вид

$$y_i(n) = \gamma_i x_i(n) + (1 - \gamma_i) y_i(n-1), \quad (1)$$

где  $y_i(n)$ ,  $y_i(n-1)$  – значения  $i$ -го сигнала на выходе фильтра соответственно в  $n$ -м и  $(n-1)$ -м циклах опроса датчика;  $x_i(n)$  – значение  $i$ -го сигнала на выходе фильтра в  $n$ -м цикле опроса датчика;  $\gamma_i$  – коэффициент.

При  $\gamma_i < 1$  оператор (1) имеет сглаживающие свойства. При стремлении к нулю промежутка времени между циклами опроса датчиков выражение (1) превращается в уравнение инерционного звена.

Согласно условиям задачи

$$x_i(n) = x_{i0}(n) + \xi_i(n),$$

где  $x_{i0}(n)$  – полезный сигнал в  $n$ -м цикле опроса;  $\xi_i(n)$  – случайная помеха в  $n$ -м цикле опроса.

При неизменном полезном сигнале ( $\Delta x_{i0}(n) = 0$ ) изменения сигнала на входе фильтра определяются изменениями случайной помехи  $\Delta \xi_i$ . Это условие позволяет восстановить закон распределения вероятностей появления различных значений  $\Delta \xi_i$ . Проведенные испытания и обработка результатов испытаний показали, что распределения вероятностей появления различных значений  $\Delta \xi_i(n)$  для различных  $x_i$  описываются нормальным законом распределения с математическим ожиданием, равным нулю.

При стационарном процессе на входе фильтра выходной сигнал фильтра описывается выражением

$$y_i(n) = \gamma_i \sum_{j=1}^{j=n} \Delta \xi_i(n) (1 - \gamma_i)^{n-j}. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет получить зависимость, связывающую изменения сигнала на выходе фильтра с изменениями случайной помехи

$$\frac{y_i(n) - y_i(n-1)}{\gamma_i} = \{ [\Delta \xi_i(n) - \Delta \xi_i(n-1)] + (1 - \gamma_i) [\Delta \xi_i(n-1) - \Delta \xi_i(n-2)] + (1 - \gamma_i)^2 [\Delta \xi_i(n-2) - \Delta \xi_i(n-3)] + \dots \}. \quad (3)$$

Правая часть выражения (3) описывает изменение сигнала на входе фильтра за один цикл опроса датчика информации. При отсутствии изменения полезного сигнала ( $\Delta x_{i0} = 0$ ) характеристика распределения вероятностей появления различных значений сигнала определяется характеристикой распределения величины  $\Delta \xi_i$  (при нормальном распределении ее математическим ожиданием и дисперсией), а также значением коэффициента  $\gamma_i$ .

Обозначим сигнал на входе фильтра при  $\Delta x_{i0} = 0$  и  $j$ -м значении коэффициента  $\gamma_i$  как  $f(\Delta \xi_{i\gamma})$ . Для определения оптимального значения  $\gamma_i$  зададимся условием, что сигнал на выходе фильтра  $y_i(n) - y_i(n-1)$  при  $\Delta x_{i0} = 0$  изменяется не более чем на величину  $\delta_i$ , если сигнал на входе фильтра изменяется не более чем на величину  $\Delta \xi_{i\alpha}$ , т. е.  $y_i(n) - y_i(n-1) \leq \delta_i$ , если  $\Delta \xi_{i\gamma} \leq \Delta \xi_{i\alpha}$ . Величина  $\Delta \xi_{i\alpha}$  выбирается из условия обеспечения минимальной стоимости ошибок при оценке допустимости изменения поступившего сигнала. Если правая часть выражения (3) – поступивший сигнал на входе фильтра при  $\Delta x_{i0} = 0$  – не превышает  $\Delta \xi_{i\alpha}$ , то из (3) следует, что коэффициент  $\gamma_i$  должен удовлетворять выражению

$$\gamma_i = \frac{\delta_i}{\Delta \xi_{i\alpha}}. \quad (4)$$

Правая часть выражения (3) есть сумма разностей соседних сигналов на входе фильтра, умноженных на коэффициенты, убывающие в геометрической прогрессии по мере удаления от  $n$ -го цикла опроса датчиков информации. При известной величине  $\gamma_i$  можно определить характеристики распределения вероятностей появления различных значений величины, описываемой правой частью выражения (3).

Согласно [8, с. 163], математическое ожидание суммы случайных величин равно сумме их математических ожиданий, дисперсия суммы или разности независимых величин равна сумме их дисперсий [8, с. 173]. Следует учитывать также, что дисперсии слагаемых в (3) уменьшаются в соответствии с коэффициентами, на которые умножаются разности двух соседних изменений случайной помехи.

Следовательно, если задать значение коэффициента  $\gamma_i$ , можно получить характеристики распределения сигнала, описываемого правой частью

выражения (3) –  $f(\Delta\xi_{iy})$ . Расчеты показывают, что для уточнения характеристик распределения вероятностей  $f(\Delta\xi_{iy})$  достаточно учитывать одно – три слагаемых в правой части выражения (3). Количество учитываемых слагаемых зависит от характеристик распределения сигнала  $\Delta\xi_i$ . Полученное распределение  $f(\Delta\xi_{iy})$  используется при определении минимального среднего риска, включающего стоимость ошибок 1-го рода – «пропуск цели», и ошибок 2-го рода – «ложная тревога».

В соответствии с [5, 6] оптимальные характеристики цифрового фильтра сигналов определяются из условия обеспечения минимального среднего риска

$$C_{cp} = C_{1(i)}P_{1(i)}P_{12(i)} + C_{2(i)}P_{II(i)}P_{21(i)}, \quad (5)$$

где  $P_{I(i)}$  – вероятность недопустимого изменения сигнала  $x_{0i}$ ;  $P_{II(i)}$  – вероятность отсутствия недопустимого изменения  $x_{0i}$ ;  $C_{1(i)}$ ,  $C_{2(i)}$  – стоимость соответственно пропуска отклонения  $x_{0i}$  и ложной тревоги;  $P_{12(i)}$ ,  $P_{21(i)}$  – соответственно условная вероятность пропуска отклонения  $x_{0i}$  и ложной тревоги, связанной с изменением  $\Delta\xi_{iy}$ .

В соответствии с выводами, представленными в [5, 6], выражения для расчета вероятностей ошибок 1-го и 2-го родов записываются в виде

$$P_{12(i)} = \int_{\Delta\xi_{i\alpha}}^{\infty} F(\Delta x_{0i}) d(\Delta x_{0i}) \int_{\infty}^{\Delta\xi_{i\alpha}} F_1(\Delta x_i) d(\Delta x_i), \quad (6)$$

где  $F_1(\Delta x_i)$  – плотность распределения вероятностей появления значений сигнала  $\Delta x_i = \Delta x_{0i} + \Delta\xi_{iy}$  (при равномерном распределении  $\Delta x_{0i}$  и нормальном распределении  $\Delta\xi_{iy}$  математическое ожидание  $\Delta x_i$  равно сумме матожиданий компонентов  $M(\Delta x_i) = 0$  и среднеквадратичное отклонение определяется по формуле  $\sigma_{\Delta x_i} = \sqrt{\sigma_{\Delta\xi_y}^2 + \sigma_{\Delta x_0}^2}$  [8]);

$$P_{21(i)} = \int_{\Delta\xi_{i\alpha}}^{\infty} f(\Delta\xi_{iy}) d(\Delta\xi_{iy}) \int_0^{\Delta\xi_{i\alpha}} F(\Delta x_{0i}) d(\Delta x_{0i}), \quad (7)$$

где  $f(\Delta\xi_{iy})$  – плотность распределения вероятностей появления значений  $\Delta\xi_{iy}$ ;  $F(\Delta x_{0i})$  – то же значений  $\Delta x_{0i}$ .

Известно, что значения интегралов функций, описывающих нормальные распределения, не могут быть представлены в виде рациональных функций. Для вычисления значений интегралов используются таблицы, разработанные Лапласом.

Оптимальное значение  $\Delta\xi_{i\alpha}$  определяется в процессе вариантных расчетов, целью которых является определение значения  $\Delta\xi_{i\alpha}$ , при котором  $C_{cp}$  принимает минимальное значение.

При расчетах величины  $P_{21(i)}$  по (7) необходимо учитывать, что характеристики распределения сигнала на входе фильтра  $f(\Delta\xi_{iy})$  зависят от величины  $\gamma_i$ , что не позволяет использовать прямое вычисление значения  $\gamma_i$ . Для расчета оптимального значения  $\gamma_i$  по выражению (4) используется итерационная процедура. На  $n$ -й итерации задается значение  $\gamma_i^{np}$ . С использованием принятого значения  $\gamma_i^{np}$  определяются оптимальное значение  $C_{cp}$  и соответствующие ему  $\Delta\xi_{iy}^{opt}$  и  $\gamma_i^{opt}$ . Расчеты прекращаются, когда принятые и оптимальные значения  $\gamma_i^{np}$  и  $\gamma_i^{opt}$  отличаются не более чем на заданную величину.

Преимуществом разработанного метода является то, что он позволяет более полно и точно учесть условия решения задачи контроля работы оборудования: влияние факторов, которые остаются вне поля зрения при использовании других методов определения характеристик цифрового фильтра сигналов. В частности, позволяет определить вероятности ошибок 1-го и 2-го родов при различных исходных условиях, учесть различные стоимости ошибок 1-го и 2-го родов, среднюю частоту недопустимых изменений контролируемого сигнала, влияние на выбор оптимального решения отношения характеристик распределений полезного сигнала и случайной помехи.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан метод построения цифрового фильтра сигналов для систем контроля работы энергетического оборудования, обеспечивающий более полный и точный учет факторов, влияющих на выбор его характеристик.
2. Использование разработанного метода не требует выполнения трудоемких предварительных испытаний по определению характеристик поступающих сигналов и позволяет применять сравнительно простые операции при осуществлении фильтрации сигналов.
3. В отличие от других методов построения цифровых фильтров сигналов разработанный метод позволяет учитывать не только характеристики поступающих сигналов, но и оценки оперативным персоналом влияния различных факторов на надежность работы оборудования: стоимости ошибок 1-го и 2-го родов при оценке изменений поступающих сигналов, вероятностей отклонений поступающих сигналов от допустимого диапазона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров, А. Н. Интерполяция и экстраполяция стационарных случайных последовательностей / А. Н. Колмогоров // Изв. АН СССР. Сер. математическая. – 1941. – № 5.
2. Wiener, N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary / N. Wiener // Time Series – O. Wiley. – 1949. – № 7. – P. 11–23.
3. Kalman, R. E. New Results in linear filtering and Prediction Theory / R. E. Kalman, R. S. Bucy // J. Basic Eng. – 1961. – Vol. 83, № 1. – P. 95–108.
4. Капеллини, В. Цифровые фильтры и их применение / В. Капеллини, А. Дж. Константинидис, П. Эмилиани; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 350 с.
5. Яницкий, В. А. Автоматизация принятия решений при оперативном управлении работой оборудования тепловых электрических станций / В. А. Яницкий // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 2. – С. 55–68.

6. Я н и ц к и й, В. А. Автоматизация принятия решений при оперативном управлении работой оборудования тепловых и атомных электрических станций / В. А. Яницкий. – Минск: РУП «БЕЛТЭИ», 2006. – 193 с.

7. И ц к о в и ч, Э. Л. Контроль производства с помощью вычислительных машин / Э. Л. Ицкович. – М., 1976. – 416 с.

8. С м и р н о в, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 500 с.

Поступила 30.04.2012

УДК 159.9:62+621.311–051:159.9

## **К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА КОТЛОТУРБИННОГО ЦЕХА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

**Инж. ДМИТРИЕВ П. И.**

*Филиал «Учебный центр подготовки  
и повышения квалификации персонала РУП «Минскэнерго»»*

Надежность функционирования электростанции зависит от надежности работы оборудования и оперативного персонала. Академик А. И. Берг отмечал, что «при машинном производстве возникает вопрос о надежности работы человека, управляющего работой машины или системой машин. Естественно, что надежность сочетания – рабочая машина и управляющий ею человек – равна произведению надежной работы обоих» [1]. В инженерной психологии этот показатель принято оценивать по комплексу внутренних свойств оперативного персонала, обуславливающих его способность сохранять на заданном уровне показатели труда и поддерживать требуемые рабочие качества в условиях существенного усложнения деятельности [2].

Наиболее сложной и ответственной функцией оперативного персонала котлотурбинного цеха (КТЦ) электростанции считается управление котельным агрегатом в случае возникновения проблемной ситуации (отклонения технологических параметров, резких изменений режимов работы, приводящих к аварийному состоянию, и т. д.). В основу исследования надежности профессиональной деятельности оперативного персонала КТЦ электростанции автором положены две фундаментальные психологические концепции: психического отражения и деятельностного подхода к изучению психических процессов.

Важным свойством психического отражения в живой природе считается его опережающий характер, а результатом – образ [3], который является не только отражением объективной реальности, но и важнейшим звеном в системе регуляции действий человека. Психологически проблема надежности работы оперативного персонала КТЦ электростанции выступает как проблема формирования адекватного отражения объекта управления (котельного агрегата) и соответственно адекватного действия, направляемого этим отражением.

В данной статье оперативный персонал КТЦ электростанции представлен машинистами центрального теплового щита (ЦТЩ) управления котла-