

УДК 004.052.42

**МЕТОД РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ ГИСТЕРЕЗИСА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ  
«ДРЕБЕЗЖАЩИХ» СИГНАЛОВ ТРЕВОГИ НА АЭС**

БОГОМОЛОВ С.Л., АНОХИН А.Н.

*АО «Русатом Автоматизированные системы управления»  
(Москва, Российская Федерация)*

**Аннотация.** Оператор АЭС часто сталкивается с сигналами тревоги, которые не требуют от него действий, но отвлекают его внимание. Для снижения количества таких сигналов предлагается проводить их подавление в автоматическом режиме с помощью метода петли гистерезиса. В работе предлагается набор коэффициентов гистерезиса и алгоритм нахождения их оптимальных значений. По результатам проведенных экспериментов выполнена оценка объема снижения числа отображаемых оператору сигналов тревоги.

**Ключевые слова:** сигналы тревоги, гистерезис, информационная перегрузка, оптимизация, метод усреднения координат

**METHOD FOR CALCULATING THE VALUE OF HYSTERESIS FOR SUPPRESSING  
«FLEETING» ALARM SIGNALS AT NPP**

SERGEY.L. BOGOMOLOV, ALEXEY.N. ANOKHIN

*Rusatom automated control systems, Joint-stock company  
(Moscow, Russian Federation)*

**Abstract.** The nuclear power plant operator is often confronted with alarms that do not require him to act, but distract his attention. To reduce the number of such signals, it is proposed to carry out their suppressing in automatic mode using the hysteresis loop method. The paper proposes a set of hysteresis coefficients and an algorithm for finding their optimal values. Based on the results of the experiments, the volume of the reduction in the number of alarms displayed to the operator was estimated.

**Keywords:** alarms, hysteresis, information overload, optimization, coordinate averaging method

**Введение**

Оператор энергоблока АЭС в ходе своей работы получает уведомления о возникших событиях (сигналах тревоги) и выполняет на их основе корректирующие действия. Часть поступающих сигналов тревоги не требует выполнения действий, а только отвлекает его внимание. Такие сигналы называются незначимыми. Для снижения их количества необходимо применение известных методов подавления.

Исследования проводились на примере технологической системы продувки-подпитки (СПП), подробно описанной в [1]. В результате предварительного анализа сработавших за 65 дней сигналов тревоги было выявлено, что более 80 % из них потенциально являются незначимыми, т.к. активировались на очень незначительное время и снялись без участия оператора или автоматики. Основным объем таких сигналов тревоги составляют частые флуктуации аналоговых технологических параметров вокруг уставки – данное явление получило название «дребезга сигнала».

В качестве методов подавления «дребезжащих» сигналов тревоги применяются [2]:

- использование петли гистерезиса;
- использование временной задержки.

Целью настоящей статьи является разработка принципов определения параметров гистерезиса, которые позволяют, с одной стороны, максимально отфильтровать «шум» и, с другой стороны, не пропустить важные отклонения, реально требующие вмешательства оператора.

**Алгоритм расчета величины гистерезиса**

Суть метода петли гистерезиса заключается в том, что для сброса сигнала тревоги технологический параметр, возвращаясь к нормальному значению, должен не только пересечь уставку, но продвинуться за уставку на величину гистерезиса.

Величина гистерезиса ( $H_{\text{верх}}$  и  $H_{\text{ниж}}$ ) рассчитывается независимо для верхних и нижних уставок ( $B_{\text{верх}}^{(i)}$  или  $B_{\text{ниж}}^{(i)}$ ). На рис. 1 проиллюстрирован метода гистерезиса для верхних уставок.

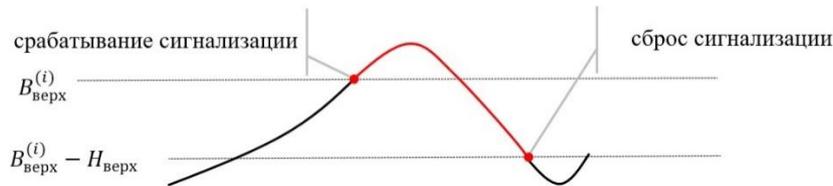


Рис. 1. Пример использования метода гистерезиса для верхних уставок

Величины гистерезисов ( $H_{\text{верх}}$  и  $H_{\text{ниж}}$ ) предлагается устанавливать для каждого технологического параметра на основании ряда его характеристик:

- диапазона изменения его значений ( $L_{\text{верх}} - L_{\text{ниж}}$ );
- физической природы (температура, уровень и др.);
- уставок, задаваемых технологами и производителями оборудования ( $B_{\text{верх}}^{(i)}$ ,  $B_{\text{ниж}}^{(i)}$ );
- погрешности измерения  $A_{\text{изм}}$ .

Схематично перечисленные характеристики представлены на рис. 2.

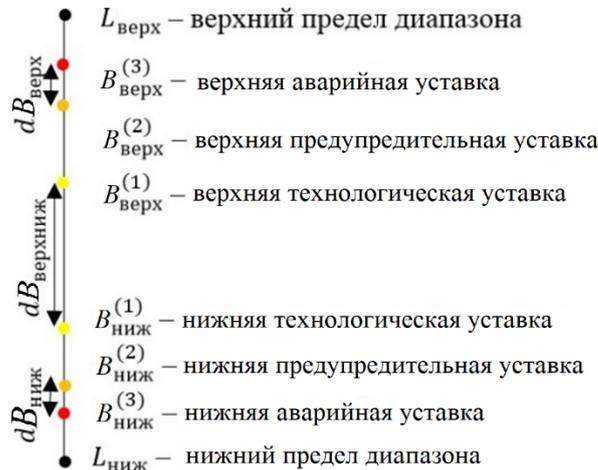


Рис. 2. Характеристики технологического параметра, участвующие в расчете гистерезиса

Значения  $H_{\text{верх}}$  и  $H_{\text{ниж}}$  предлагается определять по следующим формулам:

$$H_{\text{верх}} = \min(H_{\text{спр}} \cdot D_{\text{знач}} \cdot 10 \cdot K_1; dB_{\text{верх}} \cdot K_2; dB_{\text{верхниж}} \cdot K_3; A_{\text{изм}} \cdot 100 \cdot K_4), \quad (1)$$

$$H_{\text{ниж}} = \min(H_{\text{спр}} \cdot D_{\text{знач}} \cdot 10 \cdot K_1; dB_{\text{ниж}} \cdot K_2; dB_{\text{верхниж}} \cdot K_3; A_{\text{изм}} \cdot 100 \cdot K_4), \quad (2)$$

где:

$D_{\text{знач}}$  – диапазон изменения значений технологического параметра – разница между верхней  $L_{\text{верх}}$  и нижней  $L_{\text{ниж}}$  границами;

$H_{\text{спр}}$  – рекомендуемое в [3] значение величины гистерезиса для данного типа параметра, например: расход – 5%, уровень – 5%, давление – 2%, температура – 1%;

$K_1, K_2, K_3, K_4$  – неизвестные коэффициенты, принимающие значения в диапазоне [0; 1];

$dB_{\text{верх}}$  и  $dB_{\text{ниж}}$  – минимальная разница между верхними и нижними уставками;

$dB_{\text{верхниж}}$  – расстояние от минимального значения среди верхних уставок  $B_{\text{верх}}^{(i)}$  и верхней границы диапазона  $L_{\text{верх}}$  до максимального значения среди всех нижних уставок  $B_{\text{ниж}}^{(i)}$  и нижней границы диапазона  $L_{\text{ниж}}$ ;

$A_{\text{изм}}$  – погрешность измерения технологического параметра.

Указанные формулы (1) и (2) были разработаны из следующих соображений:

- при выходе значения параметра за, например, нижнюю уставку  $B_{\text{ниж}}^{(1)}$ , сигнал тревоги по верхней уставке  $B_{\text{верх}}^{(1)}$  гарантированно будет устранин;

– при нахождении значения параметра в диапазоне, соответствующем менее критичным уставкам, например,  $[B_{\text{верх}}^{(1)}; B_{\text{верх}}^{(2)}]$  сигнал тревоги по выходу за более критичную уставку  $B_{\text{верх}}^{(3)}$  также гарантировано будет устранен.

Значения коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  должны быть выбраны таким образом, чтобы число подавленных незначимых сигналов тревоги было максимально, а число подавленных значимых сигналов – минимально, т.е. возникает задача оптимизации.

### Метод поиска оптимальных значений коэффициентов

Для оценки эффективности подавления сигналов тревоги при применении гистерезиса воспользуемся описанным ранее методом, который позволяет выявлять сигналы, устранившиеся во время изменений состояния оборудования (условно назовем их «значимыми» сигналами) и устранившихся самостоятельно («незначимые» сигналы).

Применив значения гистерезиса к имеющимся архивным данным, рассчитаем, какое число «значимых» и «незначимых» сигналов тревоги было бы подавлено гистерезисом. Примем, что подавление «значимого» сигнала тревоги носит в два раза больший негативный эффект, чем положительный эффект от подавления «незначимого» сигнала тревоги. Исходя из этого можно предложить следующий вид целевой функции:

$$F_{\text{цел}}(K_1, K_2, K_3, K_4) = \frac{0,667 \cdot N_{\text{подзнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4) + 0,333 \cdot (N_{\text{незнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4) - N_{\text{поднезнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4))}{0,333 \cdot N_{\text{незнач}}(K_1, K_2, K_3, K_4)}, \quad (3)$$

где:

$N_{\text{подзнач}}$  и  $N_{\text{поднезнач}}$  – число подавленных «значимых» и «незначимых» сигналов тревоги;  
 $N_{\text{знач}}$  и  $N_{\text{незнач}}$  – общее число «значимых» и «незначимых» сигналов тревоги;  
 0,667 и 0,333 – весовые коэффициенты.

Для расчета  $F_{\text{цел}}$  была использована программа на языке Python. На начальном этапе исследований была предпринята попытка применения градиентного метода [4] с приближенным вычислением производных, но поскольку  $F_{\text{цел}}$  является вычисляемой функцией, то она вполне может являться многоэкстремальной недифференцируемой функцией. Следовательно, применение градиентного метода оптимизации привело бы к нахождению локальных экстремумов, а не глобального. Поэтому, для поиска экстремума  $F_{\text{цел}}$  предлагается применять известные в мировой практике методы глобальной оптимизации для недифференцируемых многоэкстремальных функций, основанные на селективном усреднении функции и на селективном усреднении координат. Методы второго типа являются более современными и перспективными ([5]), поэтому для решения поставленной задачи был применен метод селективного усреднения координат, который был реализован в виде программного кода на языке Python.

### Результаты и их обсуждение

В методе селективного усреднения координат используется равномерное распределение точек в гиперкубе размером 1. В качестве такого распределения точек был выбран «римский гиперкуб» [6].

Проведенные исследования показали, что при использовании гиперкуба размерности 4, гарантированное нахождение размещения точек в кубе, близкого к оптимальному (разница менее 0,1 %), обеспечивается при числе итераций построения гиперкуба не менее 20000.

Кроме того, было выявлено, что для того, чтобы метод находил экстремальное значение  $F_{\text{цел}}$  с высокой точностью (разброс значений не более 1,1%) независимо от начальных условий, его параметры ([3]) должны иметь следующие значения:

- значение коэффициента  $q$  – не менее 2;
- ядро – экспоненциальное « $p_s(g) = e^{-10g}$ »;
- число тестовых точек должно – не менее 300;
- число итераций – не менее 5.

Достаточно любопытным оказался тот факт, что оптимум был найден для фиксированного значения  $K_2$ , другие же коэффициенты принимали значения из некоторого диапазона  $\Delta K_{(i)}$ :

$$\begin{aligned}
 K_1 &= [0,276...1,000], \Delta K_1 = 0,72 \\
 K_2 &= [0,145...0,145], \Delta K_2 = 0 \\
 K_3 &= [0,063...0,306], \Delta K_3 = 0,24 \\
 K_4 &= [0,235...1,000], \Delta K_4 = 0,77
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Использование таких значений коэффициентов позволяют уменьшить число отображаемых оператору незначимых сигналов тревоги на 8 %

### Заключение

В работе описан метод выявления потенциально избыточных сигналов тревоги, основанный на перекрестном анализе возникающих событий и наличия ответных управляющих действий. На примере системы продувки-подпитки АЭС было выявлено следующее:

- значительная часть сигналов тревоги, которые были сняты без вмешательства оператора были вызваны флуктуациями значения параметра около уставок («дребезг»);
- был выбран метод подавления сигналов тревоги, вызванных «дребезгом» значений параметра – использование петли гистерезиса;
- разработаны формулы для расчета величины гистерезиса, использующие неизвестные коэффициенты  $K_1$ –  $K_4$ ;
- для грубой оценки эффективности применения рассчитанной величины гистерезиса предложено использование числа подавленных сигналов тревоги, устранившихся самостоятельно («незначимых» сигналов) и во время изменений состояний оборудования («значимых» сигналов);
- была предложена целевая функция  $F_{\text{цел}}$ , для которой подавление «значимого» сигнала тревоги носит в 2 раза больший негативный эффект, чем положительный эффект от подавления «незначимого» сигнала;
- выполнен анализ и выбор применяемых к такого рода функциям методов оптимизации, и выбран подходящий метод селективного усреднения координат;
- были определены значения его параметров, позволяющие находить минимум  $F_{\text{цел}}$  независимо от начальных условий;
- получены оптимальные значения коэффициентов  $K_1$  –  $K_4$  (4).

Есть основания утверждать, что дальнейшая работа в этом направлении позволит определить возможность более существенного повышения полученного процента подавленных сигналов тревоги, вызванных «дребезгом» значений технологических параметров и другими причинами.

### Список литературы

1. Андрушенко С.А. Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010.
2. Десятников И.И, Ермолаев А.Д., Ракитин И.Д. Повышение качества информационного обеспечения оператора АЭС в аномальных ситуациях // Атомная техника за рубежом. – 1986. – № 7. – С. 15–17.
3. Engineering equipment materials users' association, alarm systems. A guide to design, management and procurement. EEMUA Publication No 191, 2nd edition. – London: EEMUA, 2007.
4. Салмин И.Д. Математические методы решения оптимизационных задач. – М.: МИФИ, 2004. – 156 с.
5. Рубан А.И. Метод глобальной оптимизации, основанный на селективном усреднении координат при наличии ограничений // Вестник ТГУ. – 2013. – Вып. 1 (22). – С. 114–123.
6. Гальперин Г.А. Многомерный куб. – М.: МЦНМО, 2015. – 80 с.