

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ПОМЕХИ И ПОМЕХОПРОГНОЗА АВАРИЙ

Ключевые слова: случайный сигнал, анализ помехи, информативный признак.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ измерений, полученных от датчиков различных технических и биологических объектов, показывает, что в большинстве случаев реальный сигнал $g(t)$ состоит из полезного сигнала $x(t)$ и помехи $\varepsilon(t)$. Для устранения влияния помехи применяют методы фильтрации. При этом получить более или менее приемлемые результаты с помощью известных информационных технологий можно лишь в том случае, если выполняются классические условия, т.е. анализируемые сигналы стационарны, подчиняются нормальному закону распределения, корреляция между помехой и полезным сигналом равна нулю и помеха представляет собой «белый шум» [1–4]. В то же время в большинстве случаев указанные условия вообще не выполняются, причем помеха $\varepsilon(t)$, как правило, отличается от белого шума и частота ее спектра значительно превышает частоты спектров полезного сигнала $x(t)$ [4, 7–10]. Именно поэтому модель реального сигнала на выходе первичных датчиков после дискретизации шагом Δt имеет вид

$$g(i\Delta t) = x(i\Delta t) + \varepsilon_1(i\Delta t) + \varepsilon_2(i\Delta t) + \dots + \varepsilon_m(i\Delta t) = x(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t). \quad (1)$$

Помехи $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_j(t), \dots, \varepsilon_m(t)$ формируются под влиянием различных факторов. Некоторые из них $\varepsilon_j(t), \varepsilon_k(t), \dots, \varepsilon_m(t)$ косвенно отражают определенные процессы, происходящие на исследуемых, контролируемых или управляемых объектах, и являются носителями ценной информации. Поэтому целесообразно, не умаляя значения фильтрации, свести решение рассматриваемой задачи к созданию технологии извлечения информации от помехи, определению ее характеристик и использованию их как для коррекции погрешности результатов анализа с применением классических алгоритмов, так и для решения других актуальных задач, для которых применение традиционных технологий невозможно.

2. АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ПОМЕХИ ПРИ ОТСУТСТВИИ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПОЛЕЗНЫМ СИГНАЛОМ И ПОМЕХОЙ

Известно [1–4], что оценка корреляционной функции $R_{gg}(\tau)$ случайного сигнала $g(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ при $\tau = 0$ для случая, когда между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ корреляция равна нулю, содержит погрешность, равную дисперсии помехи D_ε [1, 5], т.е.

$$R_{gg}(\tau = 0) = \int_0^T \left[\overset{\circ}{x}(t) + \overset{\circ}{\varepsilon}(t) \right]^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\overset{\circ}{x}(t) \right]^2 dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\overset{\circ}{\varepsilon}(t) \right]^2 dt = R_{xx}(\tau) + D_\varepsilon, \quad (2)$$

где $\overset{\circ}{g}(t) = g(t) - m_g$, $\overset{\circ}{x}(t) = x(t) - m_x$, $\overset{\circ}{\varepsilon}(t) = \varepsilon(t) - m_\varepsilon$; m_g, m_x, m_ε — математические ожидания соответственно $g(t), x(t), \varepsilon(t)$.

Для случая, когда между $x(t)$ и $\varepsilon(t)$ корреляция отлична от нуля, выражение (2)

сводится к виду

$$R_{gg}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t+\tau) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \left[\varepsilon(t+\tau) x(t) + x(t+\tau) \varepsilon(t) \right] dt + \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t+\tau) dt = \begin{cases} R_{xx}(\tau) + \lambda_{x\varepsilon}(\tau) + D_\varepsilon & \text{при } \tau = 0, \\ R_{xx}(\tau) + \lambda_{x\varepsilon}(\tau) & \text{при } \tau \neq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Оценки коэффициентов ряда Фурье a_n, b_n также содержат погрешности, т.е.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T \left[x(t) + \varepsilon(t) \right] \cos n\omega t dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega t dt + \frac{2}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \cos n\omega t dt, \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T \left[x(t) + \varepsilon(t) \right] \sin n\omega t dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin n\omega t dt + \frac{2}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \sin n\omega t dt. \quad (5)$$

Указанные выше погрешности традиционных методов препятствуют широкому применению известных алгоритмов обработки зашумленных сигналов на практике.

Рассмотрим возможность определения дисперсии помехи $\varepsilon(t)$ с применением алгоритмов корреляционного анализа. Учтем, что для большинства технологических параметров при стремлении времени наблюдения T к бесконечности и шага дискретизации Δt к нулю оценки корреляционных функций полезного сигнала $R_{xx}(\tau = 0 \cdot \Delta t)$, $R_{xx}(\tau = 1 \cdot \Delta t)$, $R_{xx}(\tau = 2 \cdot \Delta t)$ оказываются достаточно близкими величинами. Если принять во внимание, что между полезным сигналом $x(t)$ и поме-

хой $\varepsilon(t)$ отсутствует корреляция, т.е. $\frac{1}{T} \int_0^T x(t) \varepsilon(t) dt \approx 0$, $\frac{1}{T} \int_0^T x(t) \varepsilon(t + \Delta t) dt \approx 0$,

$\frac{1}{T} \int_0^T x(t) \varepsilon(t + 2\Delta t) dt \approx 0$, то можно записать:

$$\frac{1}{T} \int_0^T g(t) g(t) dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T \left[x(t) + \varepsilon(t) \right] \left[x(t) + \varepsilon(t) \right] dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \varepsilon(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) x(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t) dt + D_\varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T g(t) g(t + \Delta t) dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + \Delta t) dt, \quad (7)$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T g(t) g(t + 2\Delta t) dt \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t + 2\Delta t) dt. \quad (8)$$

Следовательно, с учетом (6)–(8) имеем

$$D_\varepsilon \approx \frac{1}{T} \int_0^T g(t) g(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T g(t) g(t + 2\Delta t) dt - 2 \frac{1}{T} \int_0^T g(t) g(t + \Delta t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[g(t) g(t) + g(t) g(t + 2\Delta t) - 2 g(t) g(t + \Delta t) \right] dt. \quad (9)$$

В работе [4] приведены результаты многочисленных расчетов. Они показали, что при анализе помехи зашумленных сигналов шаг дискретизации необходимо выбрать, исходя из спектра помехи $\varepsilon(i\Delta t)$. Методика определения шага дискретизации Δt_ε подробно рассмотрена в [4], где показано, что если шаг дискретизации Δt_ε выбран с учетом специфики помехи, то алгоритм определения оценок дисперсии помехи D_ε можно представить в виде

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \varepsilon^{\circ 2}(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (g^{\circ 2}(i\Delta t) + g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+2)\Delta t) - 2g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+1)\Delta t)). \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что ориентировочные величины отсчетов $\varepsilon(i\Delta t)$ можно определить по выражению

$$\varepsilon^*(i\Delta t) = \sqrt{\varepsilon^{\circ 2}(i\Delta t)} \approx \sqrt{g^{\circ 2}(i\Delta t) + g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+2)\Delta t) - 2g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+1)\Delta t)}, \quad (11)$$

однако при этом нужно отдельно определить истинный знак подкоренной величины $\varepsilon^*(i\Delta t)$.

Для этого, принимая обозначение

$$g^{\circ 2}(i\Delta t) + g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+2)\Delta t) - 2g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+1)\Delta t) = \varepsilon'(i\Delta t), \quad (12)$$

формулу (11) представим в виде

$$\varepsilon^*(i\Delta t) = \text{sgn } \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{g^{\circ 2}(i\Delta t) + g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+2)\Delta t) - 2g^{\circ}(i\Delta t)g^{\circ}((i+1)\Delta t)} = \text{sgn } \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t)|}, \quad (13)$$

где $\text{sgn } \varepsilon'(i\Delta t)$ — знак подкоренной величины.

Из выражений (11)–(13) следует, что при выполнении условия $r_{x\varepsilon} = 0$, используя ориентировочные величины помехи $\varepsilon^*(i\Delta t)$, можно определить оценки статистических

характеристик как помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, так и полезного сигнала $x(i\Delta t)$:

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \varepsilon^{\circ 2}(i\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \varepsilon^{*2}(i\Delta t), \quad (14)$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \varepsilon^{\circ}(i\Delta t)\varepsilon^{\circ}((i+\mu)\Delta t) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \varepsilon^*(i\Delta t)\varepsilon^*((i+\mu)\Delta t), \quad (15)$$

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left[g^{\circ}(i\Delta t) - \varepsilon^{\circ}(i\Delta t) \right]^2 \approx \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left[g^{\circ}(i\Delta t) - \varepsilon^*(i\Delta t) \right]^2, \quad (16)$$

$$R_{xx}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left[g^{\circ}(i\Delta t) - \varepsilon^{\circ}(i\Delta t) \right] \left[g^{\circ}((i+\mu)\Delta t) - \varepsilon^{\circ}((i+\mu)\Delta t) \right] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left[g^{\circ}(i\Delta t) - \varepsilon^*(i\Delta t) \right] \left[g^{\circ}((i+\mu)\Delta t) - \varepsilon^*((i+\mu)\Delta t) \right], \quad (17)$$

где D_ε , $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ — дисперсия и корреляционная функция помехи; D_x и $R_{xx}(\mu)$ — дисперсия и корреляционная функция полезного сигнала.

3. АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ПОМЕХИ ПРИ НАЛИЧИИ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПОЛЕЗНЫМ СИГНАЛОМ И ПОМЕХОЙ

Теперь рассмотрим возможность определения ориентировочных величин помехи для случая, когда между полезным сигналом $x(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ имеется корреляция, т.е. $r_{x\varepsilon} \neq 0$, $r_{\varepsilon_i\varepsilon_{i+1}} = 0$ и $\Delta t = \Delta t_\varepsilon$. Принимая во внимания, что $g(i\Delta t) = x(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)$, формулу (10) представим в виде

$$\begin{aligned} D'_\varepsilon &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left[g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) \right] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left\{ \left[x(i\Delta t)x(i\Delta t) + x(i\Delta t)x((i+2)\Delta t) - 2x(i\Delta t)x((i+1)\Delta t) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[x(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + x(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) - 2x(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\varepsilon(i\Delta t)x(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)x((i+2)\Delta t) - 2\varepsilon(i\Delta t)x((i+1)\Delta t) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\varepsilon^2(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) - 2\varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Следовательно, можно записать

$$\begin{aligned} D'_\varepsilon &= \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)x(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)x((i+2)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)x((i+1)\Delta t) \right] + \\ &\quad + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)x(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)x((i+2)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)x((i+1)\Delta t) \right] + \\ &\quad + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \right] + \\ &\quad + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) \right] \approx \\ &\approx [R_{xx}(0) + R_{xx}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{xx}(\Delta t_\varepsilon)] + [R_{\varepsilon x}(0) + R_{\varepsilon x}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{\varepsilon x}(\Delta t_\varepsilon)] + \\ &\quad + [R_{x\varepsilon}(0) + R_{x\varepsilon}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{x\varepsilon}(\Delta t_\varepsilon)] + [D_\varepsilon + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t_\varepsilon)]. \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая, что для помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ справедливы равенства

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) = 0, \quad (20)$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(1\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) = 0, \quad (21)$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) = D_\varepsilon \quad (22)$$

и принимая обозначения

$$\begin{cases} R_{xx}(0) + R_{xx}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{xx}(1\Delta t_\varepsilon) = \Delta'_1, \\ R_{\varepsilon x}(0) + R_{\varepsilon x}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{\varepsilon x}(1\Delta t_\varepsilon) = \Delta'_2, \\ R_{x\varepsilon}(0) + R_{x\varepsilon}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{x\varepsilon}(1\Delta t_\varepsilon) = \Delta'_3, \end{cases} \quad (23)$$

выражение (19) запишем так:

$$D' = \Delta'_1 + \Delta'_2 - \Delta'_3 + D_\varepsilon. \quad (24)$$

Теперь, представляя выражение (10) в виде

$$D''_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \left[\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+1)\Delta t) + \overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+3)\Delta t) - 2\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+2)\Delta t) \right], \quad (25)$$

и принимая обозначение

$$\varepsilon''(i\Delta t) = \left[\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+1)\Delta t) + \overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+3)\Delta t) - 2\overset{\circ}{g}(i\Delta t)\overset{\circ}{g}((i+2)\Delta t) \right], \quad (26)$$

получим

$$D'' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon''(i\Delta t). \quad (27)$$

Очевидно, что, раскрывая выражение для определения $\varepsilon''(i\Delta t)$, можно записать:

$$\begin{aligned} D''_\varepsilon &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon''(i\Delta t) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N x(i\Delta t)x((i+1)\Delta t) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) - 2\sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) + \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+3)\Delta t) - 2\sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) + \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) - 2\sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+1)\Delta t) + \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+3)\Delta t) - 2\sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+2)\Delta t) \right) \right] = \\ &= \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+1)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+3)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+2)\Delta t) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X((i+1)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X((i+3)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) X((i+2)\Delta t) \right] + \\
& + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon((i+1)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon((i+3)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon((i+2)\Delta t) \right] + \\
& + \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon((i+1)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon((i+3)\Delta t) - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon((i+2)\Delta t) \right] \approx \\
& \approx [R_{xx}(1\Delta t) + R_{xx}(3\Delta t) - 2R_{xx}(2\Delta t)] + [R_{\varepsilon x}(1\Delta t) + R_{\varepsilon x}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon x}(2\Delta t)] + \\
& \quad + [R_{\varepsilon\varepsilon}(1\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t)]. \tag{28}
\end{aligned}$$

При этом, учитывая, что $R_{\varepsilon\varepsilon}(1\Delta t) \approx 0$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) \approx 0$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) \approx 0$, и принимая обозначение

$$\begin{cases} R_{xx}(1\Delta t_\varepsilon) + R_{xx}(3\Delta t_\varepsilon) - 2R_{xx}(2\Delta t) = \Delta_1'', \\ R_{\varepsilon x}(1\Delta t_\varepsilon) + R_{\varepsilon x}(2\Delta t_\varepsilon) - 2R_{\varepsilon x}(2\Delta t) = \Delta_2'', \\ R_{x\varepsilon}(1\Delta t_\varepsilon) + R_{x\varepsilon}(3\Delta t_\varepsilon) - 2R_{x\varepsilon}(2\Delta t) = \Delta_3'', \end{cases} \tag{29}$$

выражение для определения D'' представим в виде

$$D_\varepsilon'' = \Delta_1'' + \Delta_2'' + \Delta_3''. \tag{30}$$

Принимая во внимание равенства (23), (29) и учитывая выражения (24), (30), получим

$$D_\varepsilon \approx D_\varepsilon' - D_\varepsilon'' = \Delta_1' + \Delta_2' + \Delta_3' + D_\varepsilon - (\Delta_1'' + \Delta_2'' + \Delta_3''). \tag{31}$$

Допуская, что

$$\Delta_1' + \Delta_2' + \Delta_3' \approx \Delta_1'' + \Delta_2'' + \Delta_3'', \tag{32}$$

покажем, что для случая, когда между полезным сигналом $x(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ имеет место корреляция, т.е. $r_{x\varepsilon} \neq 0$, разность $(D_\varepsilon' - D_\varepsilon'')$ будет представлять собой оценку дисперсии помехи D_ε , т.е.

$$D_\varepsilon = D_\varepsilon' - D_\varepsilon'' \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)]. \tag{33}$$

Очевидно, что для случая $r_{x\varepsilon} \neq 0$, для определения $\varepsilon^*(i\Delta t)$ формулу (13) можно представить

$$\varepsilon^*(i\Delta t) \approx \text{sgn} [\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}. \tag{34}$$

Отсюда следует, что при обработке зашумленных сигналов $g(i\Delta t)$ вместо отсчетов $\varepsilon(i\Delta t)$ для анализа помехи можно использовать ее ориентировочную величину $\varepsilon^*(i\Delta t)$. При этом вместо отсчетов $x(i\Delta t)$ полезного сигнала также можно использовать ее ориентировочную величину

$$x^*(i\Delta t) \approx g(i\Delta t) - \varepsilon^*(i\Delta t). \tag{35}$$

Благодаря этому формулы определения оценок статистических характеристик $\overset{\circ}{\varepsilon}(i\Delta t)$ и $\overset{\circ}{x}(i\Delta t)$ для случая, когда $r_{x\varepsilon} \neq 0$, также можно представить аналогично выражениям (14)–(17).

Располагая оценками $R_{xx}(\mu)$, $R_{x\varepsilon}(\mu)$, $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$, $D_{\varepsilon\varepsilon}$, D_{xx} , определим коэффициент корреляции между полезным сигналом и помехой по выражению

$$r_{x\varepsilon} = \frac{R_{x\varepsilon}(0)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{\varepsilon\varepsilon}(0)}}. \quad (36)$$

Как показали исследования, при нарушении классических условий для анализа помехи целесообразно использовать оценки знаковых корреляционных функций:

$$R_{g\varepsilon}^*(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \text{sgn } \overset{\circ}{g}(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}(i\Delta t). \quad (37)$$

Учитывая равенство $\text{sgn } \overset{\circ}{g}(i\Delta t) \approx \text{sgn } \overset{\circ}{x}(i\Delta t)$ и то, что произведения $\text{sgn } \overset{\circ}{x}(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{x}(i\Delta t) = 1$, $\text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) = 1$, будем считать справедливыми равенства $\sum_{i=1}^N \text{sgn } \overset{\circ}{x}^*(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{x}^*(i\Delta t) = N$, $\sum_{i=1}^N \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) = N$. При этом оценки $R_{xx}^*(0)$, $R_{\varepsilon\varepsilon}^*(0)$ равны единице, т. е. $R_{xx}^*(0) = 1$, $R_{\varepsilon\varepsilon}^*(0) = 1$. Отсюда выражение для определения коэффициента корреляции $r_{x\varepsilon}^*$ между полезным сигналом $\overset{\circ}{x}(i\Delta t)$ и помехой $\overset{\circ}{\varepsilon}(i\Delta t)$ представим:

$$r_{x\varepsilon}^* \approx R_{g\varepsilon}^*(0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \text{sgn } \overset{\circ}{g}(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t). \quad (38)$$

При решении некоторых прикладных задач также можно использовать оценки релейных корреляционных функций в виде

$$R_{g\varepsilon}^{\circ\circ}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \overset{\circ}{g}(i\Delta t) \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t). \quad (39)$$

Очевидно, что, располагая ориентировочными величинами помехи $\overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t)$,

формулы для определения коэффициентов ряда Фурье $a_{n\varepsilon}$, $b_{n\varepsilon}$ помехи и коэффициентов a_{nx} , b_{nx} полезного сигнала также можно представить в следующем виде:

$$a_{n\varepsilon} \approx \frac{2}{N} \int_0^T \overset{\circ}{\varepsilon}^*(t) \cos n\omega t dt = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^N \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) \cos n\omega(i\Delta t), \quad (40)$$

$$b_{n\varepsilon} \approx \frac{2}{N} \int_0^T \overset{\circ}{\varepsilon}^*(t) \sin n\omega t dt = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^N \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) \sin n\omega(i\Delta t), \quad (41)$$

$$\begin{aligned} a_{nx} &\approx \frac{2}{N} \int_0^T \overset{\circ}{g}(t) \cos n\omega t dt - \frac{2}{N} \int_0^T \overset{\circ}{\varepsilon}^*(t) \cos n\omega t dt = \\ &= \frac{2}{N} \sum_{i=0}^N \left[\overset{\circ}{g}(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) \right] \cos n\omega(i\Delta t), \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
b_{nx} &\approx \frac{2}{N} \int_0^T \overset{\circ}{g}(t) \sin n\omega t dt - \frac{2}{N} \int_0^T \overset{\circ}{\varepsilon}^*(t) \sin n\omega t dt = \\
&= \frac{2}{N} \sum_{i=0}^N \left[\overset{\circ}{g}(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) \right] \sin n\omega(i\Delta t). \quad (43)
\end{aligned}$$

Выражения (14)–(17), (36)–(43) открывают широкие возможности для создания ряда эффективных информационных технологий мониторинга и прогнозирования аварий путем анализа реальных технологических параметров, получаемых на выходах различных датчиков, установленных на объектах контроля и управления.

4. АЛГОРИТМЫ ПОМЕХОМОНИТОРИНГА И ПОМЕХОПРОГНОЗА ПЕРЕХОДА ОБЪЕКТА В АВАРИЙНОЕ СОСТОЯНИЕ

Анализ различных технических объектов показал, что еще до предаварийных ситуаций, когда состояние объекта считается стабильным и характеристики полезного сигнала $x(t)$ не изменяются, происходят определенные изменения параметров помехи $\overset{\circ}{\varepsilon}(t)$, которые формируются в момент изначальной фазы появления неисправностей [5–9].

В то же время в большинстве случаев в реальных объектах имеются определенные трудности прогнозирования изменения состояния объекта на ранних стадиях появления неисправностей с применением известных методов. В лучшем случае они дают возможность обнаружить лишь явно выраженных неисправности [1, 7–9]. Анализ возникновения аварийных ситуаций на реальных объектах показывает, что им всегда предшествуют скрытые микроисправности, возникающие в виде микроизносов, микробиений, микровибраций, микротрещин и т.д. в некоторых элементах объекта. Их своевременное выявление дает возможность прогнозировать возможные изменения в состоянии объекта, что может использоваться для предупреждения и предотвращения серьезных аварий. Для этой цели в структуре современных информационных систем можно создать подсистемы помехомониторинга и помехопрогноза, функционирующие на основе анализа помех $\overset{\circ}{\varepsilon}_1(i\Delta t), \overset{\circ}{\varepsilon}_2(i\Delta t), \dots, \overset{\circ}{\varepsilon}_n(i\Delta t)$ как носителя полезной информации сигналов $\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t), \overset{\circ}{g}_2(i\Delta t), \dots, \overset{\circ}{g}_n(i\Delta t)$. При этом с помощью характеристик помехи $\overset{\circ}{\varepsilon}_1(i\Delta t), \overset{\circ}{\varepsilon}_2(i\Delta t), \dots, \overset{\circ}{\varepsilon}_m(i\Delta t)$ зашумленных сигналов $\overset{\circ}{g}_1(i\Delta t), \overset{\circ}{g}_2(i\Delta t), \dots, \overset{\circ}{g}_m(i\Delta t)$ обнаружение начальной стадии появления микроизменений можно осуществить по приведенным ниже алгоритмам:

$$D_{\varepsilon} = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} = 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}''(i\Delta t)] & \text{при } r_{x\varepsilon} \neq 0, \end{cases} \quad (44)$$

$$R_{x\varepsilon}(\mu) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) \sqrt{|\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t)|}] \text{sgn } \overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) \sqrt{|\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t)|} & \text{при } r_{x\varepsilon} = 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - \text{sgn}[\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}''(i\Delta t)] \sqrt{|\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}''(i\Delta t)|}] \times \\ \times \text{sgn}[\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}''(i\Delta t)] \sqrt{|\overset{\circ}{\varepsilon}'(i\Delta t) - \overset{\circ}{\varepsilon}''(i\Delta t)|} & \text{при } r_{x\varepsilon} \neq 0, \end{cases} \quad (45)$$

$$r_{x\varepsilon} \approx r_{x\varepsilon}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} \overset{\circ}{x}^*(i\Delta t) \operatorname{sgn} \overset{\circ}{\varepsilon}^*(i\Delta t) =$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} [g(i\Delta t) - \operatorname{sgn} [\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}] \times$$

$$\times \operatorname{sgn} [\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}, \quad (46)$$

$$a_{n\varepsilon} \approx \begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t)|}] \cos n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} = 0, \\ \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \{\operatorname{sgn}[\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}\} \cos n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} \neq 0, \end{cases} \quad (47)$$

$$b_{n\varepsilon} \approx \begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t)|}] \sin n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} = 0, \\ \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \{\operatorname{sgn}[\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}\} \sin n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} \neq 0, \end{cases} \quad (48)$$

$$a_{nx} \approx \begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - \operatorname{sgn}[\varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t)|}]] \cos n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} = 0, \\ \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - \{\operatorname{sgn}[\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}\}] \cos n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} \neq 0, \end{cases} \quad (49)$$

$$b_{nx} \approx \begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - \operatorname{sgn} \varepsilon'(i\Delta t) \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t)|}] \sin n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} = 0, \\ \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N [g(i\Delta t) - \{\operatorname{sgn}[\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)] \times \\ \times \sqrt{|\varepsilon'(i\Delta t) - \varepsilon''(i\Delta t)|}\}] \sin n\omega(i\Delta t) & \text{при } r_{x\varepsilon} \neq 0. \end{cases} \quad (50)$$

Использование взаимосвязи между микроизменением в состоянии объекта и изменением значений оценок, полученных по выражениям (44)–(50), дает большие возможности для мониторинга и прогнозирования возможных аварий. Процесс по-мехопрогнозирования аварий в технических объектах с применением вышеприведенных алгоритмов представляет собой совокупность трех составляющих: 1) множества W , сформированного по оценкам $D_{\varepsilon_1}, D_{\varepsilon_2}, \dots, D_{\varepsilon_m}; R_{\varepsilon_1\varepsilon_1}(\mu), R_{\varepsilon_2\varepsilon_2}(\mu), \dots, R_{\varepsilon_m\varepsilon_m}(\mu); R_{x_1\varepsilon_1}(\mu), R_{x_2\varepsilon_2}(\mu), \dots, R_{x_m\varepsilon_m}(\mu); r_{x_1\varepsilon_1}, r_{x_2\varepsilon_2}, \dots, r_{x_m\varepsilon_m}; a_{0\varepsilon_1}, a_{1\varepsilon_1}, \dots, a_{n\varepsilon_1}, b_{0\varepsilon_1}, b_{1\varepsilon_1}, \dots, b_{n\varepsilon_1}; a_{0x_2}, a_{1x_2}, \dots, a_{nx_2}, b_{0x_2}, b_{1x_2}, \dots, b_{nx_2}$, соответствующим каждому i -му состоянию из всех k возможных состояний объекта; 2) множества V , сформированного из текущих аналогичных информативных признаков, доставляющих информацию о текущем состоянии; 3) правила идентификации F , сопоставляющего каждый элемент множества W с элементом множества V и, наоборот, каждый элемент из множества V — с элементом множества W . Совокупность элементов множеств W и V образует информационное обеспечение подсистемы [2, 4, 10, 11].

5. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОМЕХОПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙ ПРИ БУРЕНИИ

Теперь рассмотрим возможность применения алгоритмов (44)-(50) на примере решения задачи помехомониторинга и помехопрогноза аварий при бурении нефтяных скважин.

Исследования показали, что на практике в процессе бурения на технологических параметрах $g(i\Delta t)$, получаемых из выходов датчиков, возникают различные ощутимые помехи $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \dots, \varepsilon_m(t)$, и они отражаются на суммарных сигналах $g_1(t) = x_1(t) + \varepsilon_1(t)$, $g_2(t) = x_2(t) + \varepsilon_2(t)$, ..., $g_m(t) = x_m(t) + \varepsilon_m(t)$. Поэтому в процессе бурения оценки спектральных и корреляционных характеристик измерительной информации определяются с большими погрешностями, и это приводит к ошибочным прогнозам аварий. При этом также не учитывается возможность использования помехи, которую содержат основные технологические параметры бурения, как носителя информации. Специфика рассматриваемого процесса отличается еще и тем, что наиболее опасным авариям, например связанным с прихватом бурильного инструмента, предшествуют существенные изменения значений помех измеряемых параметров, и они начинают проявляться задолго до возникновения признаков самой аварии [4]. Поэтому при создании и внедрении интеллектуальной системы помехопрогнозирования аварий возникает необходимость формирования в процессе бурения эталонных множеств оценок статистических характеристик как самих сигналов, так и их помех, которые используются в качестве базы знаний для принятия решений. Исходными данными для такой системы служат сигналы от датчиков следующих контролируемых параметров бурения: осевая нагрузка на инструмент $g_1(t)$; крутящий момент на шпинделе вращателя бурильного станка $g_2(t)$; крутящий момент на роторе бурильного станка $g_3(t)$; механическая скорость бурения $g_4(t)$; расход промывочной жидкости на выходе циркуляционной системы $g_5(t)$; давление промывочной жидкости на выходе циркуляционной системы $g_6(t)$; качественные параметры промывочной жидкости $g_7(t)$ и др.

Авариям предшествуют изменения оценок помехи, в первую очередь, на осевой нагрузке на инструмент $g_1(t)$, в крутящем моменте на шпинделе вращателя бурильного станка $g_2(t)$, в крутящем моменте на роторе бурильного станка $g_3(t)$ и в механической скорости бурения $g_4(t)$. Поэтому для анализа указанных контролируемых параметров бурения прежде всего необходимо оценить дисперсии помех $D_{\varepsilon_1}, D_{\varepsilon_2}, D_{\varepsilon_3}, D_{\varepsilon_4}$ и суммарных сигналов $D_{g_1}, D_{g_2}, D_{g_3}, D_{g_4}$. Учитывая, что как дисперсия помехи, так и соотношения $\frac{D_{\varepsilon_1}}{D_{g_1}}, \frac{D_{\varepsilon_2}}{D_{g_2}}, \frac{D_{\varepsilon_3}}{D_{g_3}}, \frac{D_{\varepsilon_4}}{D_{g_4}}$ являются достаточно информативными элементами, из них формируется множество эталонных признаков $W_{D\varepsilon}$:

$$W_{D\varepsilon} = \left\{ \begin{array}{cccc} D_{\varepsilon_1} & D_{\varepsilon_2} & D_{\varepsilon_3} & D_{\varepsilon_4} \\ \frac{D_{\varepsilon_1}}{D_{g_1}} & \frac{D_{\varepsilon_2}}{D_{g_2}} & \frac{D_{\varepsilon_3}}{D_{g_3}} & \frac{D_{\varepsilon_4}}{D_{g_4}} \end{array} \right\}, \quad (51)$$

где D_{g_1}, \dots, D_{g_4} — дисперсии суммарных сигналов соответственно $g_1(t), \dots, g_4(t)$; $D_{\varepsilon_1}, \dots, D_{\varepsilon_4}$ — дисперсии помех тех же сигналов.

По выражениям (47)–(50) определяются соответствующие оценки спектральных характеристик помех и полезных сигналов, и из них формируются эталонные множества

$$W_{ab}^B = \left\{ \begin{array}{cccc} a_{0\varepsilon_1}, a_{1\varepsilon_1}, \dots, a_{n\varepsilon_1} & b_{0\varepsilon_1}, b_{1\varepsilon_1}, \dots, b_{n\varepsilon_1} \\ a_{0x_1}, a_{1x_1}, \dots, a_{nx_1} & b_{0x_1}, b_{1x_1}, \dots, b_{nx_1} \end{array} \right\}. \quad (52)$$

Наряду с оценкой корреляционных характеристик $g_1(x), g_2(x), g_3(x), g_4(x)$ и их полезных сигналов $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$ также определяются оценки полез-

ных сигналов $x_5(t)$, $x_6(t)$ таких параметров бурения, как расход $g_5(t)$ и давление промывочной жидкости на входе циркуляционной системы $g_6(t)$. По результатам $R_1(x_1)$, $R_2(x_2)$, $R_3(x_3)$, $R_4(x_4)$, $R_5(x_5)$, $R_6(x_6)$ формируется множество эталонных оценок корреляционных функций, т.е.

$$W_{R_{gg}} = \left\{ \begin{array}{l} R_1(x_1), R_2(x_2), R_3(x_3), R_4(x_4), R_5(x_5), R_6(x_6) \\ R_1(g_1), R_2(g_2), R_3(g_3), R_4(g_4), R_5(g_5), R_6(g_6) \end{array} \right\}. \quad (53)$$

По выражению (46) определяются оценки коэффициента корреляции, и из них также аналогичным образом формируется множество информативных признаков

$$W_{g\epsilon} = \{r_{g_1\epsilon_1}, r_{g_2\epsilon_2}, \dots, r_{g_8\epsilon_8}\}. \quad (54)$$

Таким образом, сформированные эталонные множества W_{D_ϵ} , W_{ab}^R , $W_{R_{gg}}$, $W_{g\epsilon}$ представляют собой эталонные базы знаний для принятия решений при бурении. Они позволяют построить интеллектуальную систему помехопрогнозирования аварий. Анализ тенденций их развития показывает, что создание такой системы целесообразно не для отдельных скважин, а для всего нефтегазового месторождения. При этом затраты даже на достаточно дорогостоящие системы оправданы. На рис. 1 представлена блок-схема интеллектуальной системы мониторинга и прогнозирования аварий при бурении скважин на месторождениях нефти и газа, в которой наряду с вышеприведенной технологией формирования баз знаний также имеется и блок анализа сигналов по традиционным методам и алгоритмам.

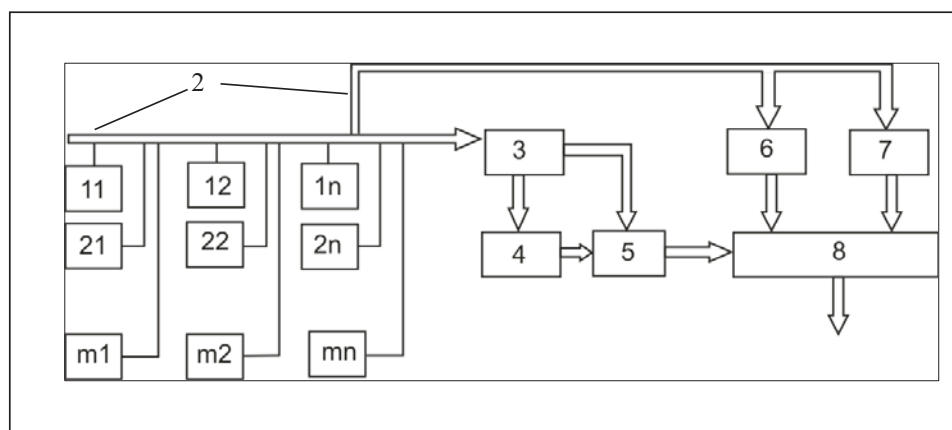


Рис. 1

Система состоит из следующих блоков: 11, 12, ..., mn — датчики контролируемых параметров бурения; 2 — интерфейс; 3 — блок формирования информативных признаков; 4 — база эталонных знаний; 5 — блок идентификации по помехотехнологиям; 6 — блок анализа по традиционным методам и алгоритмам; 7 — база технологических и геологических данных; 8 — блок принятия решений, представляющий собой экспертную систему.

Процедура прогнозирования аварий при бурении скважин сводится к следующему. На первом этапе для первой скважины месторождения нефти и газа система работает в режиме обучения, и по результатам анализа сигналов, полученных с датчиков 11, 12, ..., mn в процессе бурения, в блоке 3 формируются множества эталонных оценок указанных сигналов по выражениям (44)–(50). Эти оценки хранятся в блоке 4 и соответствуют безаварийным состояниям режима бурения. При осложнениях в процессе бурения соответствующие информативные признаки также формируются и запоминаются в базе элементов эталонных множеств, предшествующих аварийным ситуациям. По полученным результатам идентификации в блоке 5

завершается процесс адаптации интеллектуальной системы к конкретным условиям бурения с учетом знаний специалистов, технологических, геологических и других данных. Накопленные и адаптированные для первой скважины месторождения базы знаний в дальнейшем используются при бурении последующих скважин. При функционировании системы в режиме мониторинга в блоке идентификации 5 элементы эталонных множеств сравниваются с множествами оценок, получаемых в процессе измерения и обработки тех же сигналов в текущий момент времени. Эти сигналы анализируются также в блоке анализа по традиционным методам и алгоритмам 6. В блок принятия решений 8 поступают также результаты идентификации из блока 5 и из блока технологических и геологических данных 7. Результаты, полученные из блоков 5–7, анализируются в блоке принятия решений 8. Когда текущие информативные признаки не совпадают с элементами эталонных баз знаний, информация об этом немедленно представляется специалистам, которые используют ее для принятия решения о дальнейшем режиме эксплуатации скважины. Таким образом, рассматриваемая система позволяет осуществить мониторинг и прогнозирование; выработать рекомендации по локализации и ликвидации аварийно-опасных и аварийных ситуаций в начале их зарождения; выдачу аудиовизуальной предупредительной сигнализации и рекомендаций на монитор бурового мастера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Т. А. Экспериментальный анализ. — М.: Машиностроение, 1991. — 272 с.
2. Bendat Julius S., Piersol Allan G. Random Data: Analysis & Measurement Procedures. — Wiley-Interscience, 2000. — 594 p.
3. Preumont A. Random Vibration and Spectral Analysis (Solid Mechanics and Its Appl., 33). — New York: Kluwer Academ. Publ., 1994. — 271 p.
4. Aliiev T. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. — New York: Kluwer Academ. Publ., 2003. — 199 p.
5. Mehrotra A., Sangiovanni-Vincentelli A. Noise Analysis of Radio Frequency Circuits. — New York: Kluwer Academ. Publ., 2004 — 184 p.
6. Abdelhak M. Zoubir and D. Robert Iskander. Bootstrap techniques for signal processing. — Cambridge University Press, 2004 — 217 p.
7. Бранцевич П. Ю. Алгоритмы определения амплитудных и фазовых параметров вибрации. МНТК «Новые информационные технологии в науке и производстве» // Материалы конф. — Минск: БГУИР-Медиум, 1998. — С. 219–222.
8. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. — СПб: Гос. морской техн. ун-т, 2000. — 169 с.
9. Collacott R. A. Structural Integrity Monitoring. — London; New York: Chapman and Hall, 1989. — 270 p.
10. Абломейко С. В., Лагуновский Д. М. Обработка изображений: технология, методы, применения. — Минск: Амалфея, 2000. — 304 с.
11. Jin J. and Shi J. Feature-preserving data compression of stamping tonnage information using wavelets // Technometrics. — 1999. — 41, N 4. — P. 327–339.

Поступила 04.03.2004.

После доработки 14.11.2007