

## ТЕХНОЛОГИИ РАННЕГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОЦЕНОК ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОМЕХИ\*

**Ключевые слова:** помеха с отличным от нуля математическим ожиданием, зашумленный сигнал, плотность распределения, система контроля, диагностика мониторинга.

### Введение

Известно, что чрезвычайные ситуации возникают в результате негодности производственных фондов, ветшания технологического оборудования, износа систем противоаварийной защиты, нарушения производственного процесса, отсутствия непрерывного контроля за состоянием технологического процесса, нарушения технологии производства и т.д. [1]. К авариям приводят повреждения, поломки, коррозии, выход из строя агрегатов, двигателей, оборудования, машин, станков, механизмов, разрушение строительных сооружений, систем жизнеобеспечения зданий и т.д.

Например, основными причинами, приводящими к разрушению строительной конструкции, могут быть визуально невидимые дефекты, которые появляются даже при относительно слабых, но частых сейсмических воздействиях на высотные здания, большепролетные конструкции, спортивные сооружения, строительные конструкции, энергетические объекты, промышленные объекты и т.д. Кроме того, основными причинами аварий строительных объектов и конструкций являются также внешние техногенные (неравномерные деформации основания) и природные воздействия (снег, ветер, вода, температура и т.п.); превышение эксплуатационных нагрузок и износ; ошибки при проектировании; экстремальные воздействия в результате пожара, взрыва и т.д. [1].

При бурении основными видами аварий являются прихваты, поломка и отвинчивание бурильных труб, поломка в скважине долот и турбобуров, падение бурильного инструмента и других предметов в скважину. Подобные аварии могут возникнуть при резком изменении гидравлического давления в скважине в результате выброса, нарушения целостности ствола скважины, заклинивания бурильной и обсадной колонн и т.д.

Аварии на объектах теплоснабжения, к которым относятся теплотрассы, котельные установки, когенерационные станции и т.д., происходят в результате повреждений, коррозий, дефектов и т.д. в трубопроводах, тепловых сетях, котлах и общекотельном оборудовании и т.д. [1].

Для того чтобы в вышеуказанных случаях исключить перерастание мелких повреждений в крупномасштабную чрезвычайную ситуацию, необходимо своевременно выявить возникшие неполадки на ранней стадии и провести профилактические и ремонтные работы [1]. Для этого на технических объектах совершенствуются технологические процессы, повышается надежность технологического оборудования и систем, применяются конструкторские и

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Научного фонда Государственной нефтяной компании Азербайджана SOCAR.  
© Т.А. АЛИЕВ, Н.Ф. МУСАЕВА, 2019

технологические решения, используется высококачественное сырье, материалы, комплектующие изделия, используются и совершенствуются системы технологического мониторинга, контроля, технической диагностики, безаварийной остановки производства, проводится локализация и подавление аварийных ситуаций и т.д. Это особенно важно, например, на объектах нефтяной, химической и газовой промышленности; на предприятиях, которые производят, используют, хранят и транспортируют взрыво- и огнеопасные вещества и материалы, ядовитые вещества [1].

Однако перечисленные мероприятия и работы не дают возможность выявить дефекты на начальном периоде их появления, когда они еще находятся в скрытом виде. Поэтому для раннего обнаружения техногенных ситуаций и мониторинга аварий необходимо разработать алгоритмы обнаружения раннего периода зарождения дефекта, определить динамику развития неисправности, своевременно оповестить обслуживающий персонал о необходимости остановки и проведения профилактических ремонтных работ.

В последние годы для решения этих задач разработаны методы, основанные на оценке текущего технического состояния производственных объектов с использованием характеристик помехи [2–15].

В данной работе предлагаются технологии раннего мониторинга технических объектов на основе анализа оценок плотности распределения помехи, имеющей отличное от нуля математическое ожидание. С помощью этой информации система мониторинга может формировать информацию о целесообразности проведения необходимых мероприятий на раннем этапе возникновения неисправности.

### 1. Постановка задачи

Пусть от датчика, размещенного в зоне действия влияющих на объект факторов, поступает зашумленный цифровой сигнал  $G(t)$ . При стабильном состоянии объекта сигнал  $G(t)$  состоит из полезного сигнала  $X(t)$  и аддитивной помехи  $E_1(t)$ , возникшей в результате воздействия внешних факторов:  $G(t) = X(t) + E_1(t)$ . В системе мониторинга, контроля, диагностики, прогноза, управления, идентификации и т.д. при появлении износа, коррозии, трещин, поломок, повреждений, выходов из строя агрегатов, двигателей, механизмов, разрушений строительных сооружений, систем жизнеобеспечения зданий и т.д. также возникает помеха  $E_2(t)$ . Тогда зашумленный сигнал  $G(t)$  можно представить в виде  $G(t) = X(t) + E(t)$ , где  $E(t) = E_1(t) + E_2(t)$ .

Сигналы  $X(t)$ ,  $E(t)$ ,  $G(t)$  являются случайными стационарными эргодическими процессами, и помеху  $E(t)$  невозможно выделить из  $G(t)$ . Для зашумленного сигнала  $G(t)$  можно вычислить математическое ожидание  $m_G$ , дисперсию  $D_G$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma_G$ , корреляционную функцию  $R_{GG}(\tau)$  [16–9]:

$$m_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(i\Delta t),$$

$$D_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [G(i\Delta t) - m_G]^2, \quad \sigma_G = \sqrt{D_G}, \quad (1)$$

$$R_{GG}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(i\Delta t) G((i + \mu)\Delta t),$$

где  $\Delta t$  — шаг дискретизации,  $\mu = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$  — временной сдвиг.

При этом сигнал  $X(t)$  оценивает текущее состояние исследуемого процесса. Априори известно, что помеха  $E(t)$  имеет нормальное распределение  $N(\varepsilon; m_E, \sigma_E)$  и нулевое среднее  $m_E = 0$ . Кроме того, помеха  $E(t)$  не коррелирована с полезным сигналом, причем в момент зарождения дефекта время корреляции шума  $E(t)$  меньше времени корреляции полезного сигнала.

Поскольку стационарная случайная помеха  $E(t)$  — эргодическая, то ее математическое ожидание  $m_E$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_E$  имеют одно и то же значение для любого из случайных сигналов, входящих в совокупность. Поэтому функцию плотности нормального распределения  $N(\varepsilon; m_E, \sigma_E) = N(\varepsilon)$  помехи представим

$$N(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_E \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon - m_E)^2}{2\sigma_E^2}}. \quad (2)$$

При этом следует отметить, что дисперсия  $D_E$  помехи  $E(t)$ , входящая в формулу (2), состоит из дисперсии  $D_{E_1}$  помехи  $E_1(t)$  от внешних факторов и дисперсии  $D_{E_2}$  помехи  $E_2(t)$  в результате образования неисправности:  $D_E = D_{E_1} + D_{E_2}$ . Предполагается, что дисперсия  $D_{E_1}$  помехи  $E_1(t)$  от внешних факторов постоянна или же изменения внешних воздействий поддаются контролю. Дисперсия  $D_{E_2}$  помехи  $E_2(t)$ , возникшей в результате дефекта, не поддается контролю. Поэтому по виду и динамике изменения функции плотности распределения  $N(\varepsilon)$  помехи  $E(t)$  можно судить об изменениях, происходящих в техническом состоянии исследуемого объекта, так как различным степеням неисправности соответствуют различные виды кривой  $N(\varepsilon)$ . Поэтому ниже предлагаются технологии раннего мониторинга различных конкретных технических объектов на основе анализа оценок плотности распределения  $N(\varepsilon)$  помехи  $E(t)$  с отличным от нуля математическим ожиданием.

## 2. Алгоритмы вычисления оценок плотности распределения помехи с отличным от нуля математическим ожиданием для определения раннего периода и динамики развития неисправностей технических объектов

Из формулы (2) очевидно, что для определения плотности распределения помехи  $E(t)$  необходимо вычислить среднее квадратическое отклонение  $\sigma_E = \sqrt{D_E}$  и математическое ожидание  $m_E$ . Так как помеха  $E(t)$  распределена по нормальному закону с нулевым средним  $m_E = 0$ , то задача сводится к вычислению параметра  $\sigma_E$  и построению доверительного интервала для оценки математического ожидания.

Вычислим сначала дисперсию  $D_E$  помехи, используя выражение (1)

$$R_{GG}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\overset{\circ}{X}(i\Delta t) + E(i\Delta t))(\overset{\circ}{X}((i + \mu)\Delta t) + E((i + \mu)\Delta t)),$$

$\overset{\circ}{X}(i\Delta t) = X(i\Delta t) - m_X$ ,  $m_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)$  — математическое ожидание  $X(t)$ .

Учитывая, что сигнал  $X(t)$  и помеха  $E(t)$  некоррелированы, т.е.

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{X}(i\Delta t) E((i + \mu)\Delta t) = 0, \quad \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(i\Delta t) \overset{\circ}{X}((i + \mu)\Delta t) = 0,$$

можно написать [2–15]:

$$R_{GG}(\mu) = R_{XX}(\tau) + R_{EE}(\mu), \quad (3)$$

где  $R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) X((i+\mu)\Delta t)$  — корреляционная функция  $X(t)$ ,  $R_{EE}(\mu) =$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(i\Delta t) E((i+\mu)\Delta t) \text{ — корреляционная функция помехи } E(t).$$

При этом на практике для таких инфранизкочастотных медленно протекающих технологических процессов: нефтепереработка, нефтехимия, когда  $\mu = \Delta t$  значительно мало по сравнению со временем наблюдения  $T$ , помеха  $E(t)$  формируется из высокочастотных спектров в результате возникновения таких неисправностей, как износ, коррозия, нагарообразование и т.д. и имеет более высокий спектр, чем сама полезная составляющая  $X(t)$ . Значение же полезной составляющей за время  $\Delta t$  не успевает измениться, и  $X(t + \Delta t)$  совпадает со значением  $X(t)$ , т.е.

$$X(t + \Delta t) = X(t). \quad (4)$$

Это равенство выполняется для случаев, когда  $T$  составляет, например, 10–20 часов, а  $\Delta t$  — секунды или минуты (в зависимости от специфики исследуемого процесса). В этом случае шаг дискретизации  $\Delta t$  выбирается исходя из конечного времени корреляции  $\mu_{\text{кор}}$  помехи  $E(t)$  с полезным сигналом. Очевидно, что такое строгое равенство справедливо не для всех реальных процессов, а для таких, как нефтепереработка, нефтехимия. Для остальных технологических процессов допустимо приближенное равенство. Тогда для указанных объектов при выполнении условия (4) отношение  $\frac{R_{XX}(\Delta t)}{R_{XX}(0)}$  равно единице, т.е. [16]:

$$R_{XX}(\Delta t) = R_{XX}(0).$$

В то же время в силу того, что для случайной помехи шаг дискретизации  $\Delta t$  выбран, исходя из конечного времени корреляции  $\mu_{\text{кор}}$  помехи, то  $R_{EE}(\mu)$  можно представить [2–15]

$$R_{EE}(\mu) = \begin{cases} R_{EE}(0) & \text{при } \mu = 0, \\ 0 & \text{при } \mu \geq \Delta t. \end{cases} \quad (5)$$

Поэтому, если по формуле (1) вычислить оценки корреляционной функции  $R_{GG}(\mu)$  зашумленного сигнала при  $\mu = 0$  и достаточно малом по сравнению со временем наблюдения  $T$  временном интервале  $\mu_{\text{кор}} = \Delta t$  и найти разницу между этими оценками, получим

$$R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t) = R_{XX}(0) + R_{EE}(0) - R_{XX}(\Delta t) - R_{EE}(\Delta t). \quad (6)$$

Учитывая условия (5), (6), а также то, что оценки автокорреляционных функций соответственно полезного сигнала  $X(t)$  и помехи  $E(t)$  при нулевом временном сдвиге  $\mu = 0$  представляют собой дисперсии соответственно полезного сигнала и помехи:  $R_{XX}(0) = D_X$ ,  $R_{EE}(0) = D_E$ , получаем

$$D_E^* = R_{GG}(\mu = 0) - R_{GG}(\mu = \Delta t). \quad (7)$$

В работах [2–15] была выведена формула вычисления дисперсии помехи для более общего случая, когда шаг дискретизации  $\Delta t$  выбран, исходя из частот-

ной полосы спектра помехи  $E(t)$ , т.е.  $\Delta t = 1/(2f_\varepsilon)$ , где  $f_\varepsilon$  — частота среза помехи (герц), а также имеется корреляция между полезным сигналом  $X(t)$  и помехой  $E(t)$ :

$$D_E^* = R_{GG}(\mu=0) - 2R_{GG}(\mu=\Delta t) + R_{GG}(\mu=2\Delta t). \quad (8)$$

После вычисления среднего квадратического отклонения  $\sigma_E^*$  помехи можно определить доверительный интервал для математического ожидания  $m_E = 0$  помехи. Известно, что доверительный интервал для оценки математического ожидания при известном среднем квадратическом отклонении вычисляется по выражению [19]

$$\left( m_E - z_p \cdot \frac{\sigma_E}{\sqrt{N}}; m_E + z_p \cdot \frac{\sigma_E}{\sqrt{N}} \right), \quad (9)$$

где  $z_p$  можно найти, задавая определенную доверительную вероятность  $p = 1 - \alpha = \Phi(z)$ ; например, для вероятности  $p = 0,95$  имеем  $z_{0,95} = 1,96$ ;  $N$  — объем выборки.

Тогда с учетом выражений (7)–(9) и условия  $m_E = 0$  можно вычислить уточненную оценку математического ожидания  $m_E^*$  помехи:

$$m_E^* = z_p \cdot \frac{\sigma_E^*}{\sqrt{N}}. \quad (10)$$

Принимая во внимание (2), (7)–(10), предлагается вычислять плотность распределения  $N^*(\varepsilon)$  нормально распределенной помехи  $E(t)$  по выражению

$$N^*(\varepsilon(i)) = \frac{1}{\sigma_E^* \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon(i) - m_E^*)^2}{2(\sigma_E^*)^2}}, \quad (11)$$

где дискретные значения функции плотности распределения  $N^*(\varepsilon)$  помехи  $E(t)$  вычисляются в интервале  $m_E^* \pm 3\sigma_E^*$ , т.е. при  $m_E^* - 3\sigma_E^* \leq E(t) \leq m_E^* + 3\sigma_E^*$ .

Максимум функции плотности нормального распределения  $N_{\max}^*(\varepsilon(i))$  помехи, который находится в точке  $m_E^*$ , определяется по выражению

$$N_{\max}^*(m_E^*) = \frac{1}{\sigma_E^* \sqrt{2\pi}} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))} & \text{для частного случая,} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot (R_{GG}(\mu=0) - 2R_{GG}(\mu=\Delta t) + R_{GG}(\mu=2\Delta t))} & \text{для общего случая.} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Точки перегиба с координатами } \left( m_E^* - \sigma_E^*; \frac{1}{\sigma_E^* \sqrt{2\pi e}} \right) \text{ и } \left( m_E^* + \sigma_E^*; \frac{1}{\sigma_E^* \sqrt{2\pi e}} \right)$$

вычисляются по выражениям:

— для первой и второй точек по оси абсцисс:

$$AE1^* = \begin{cases} z_p \cdot \frac{\sqrt{(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))}}{\sqrt{N}} - \sqrt{(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))} & \text{для частного случая,} \\ z_p \cdot \frac{\sqrt{(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))}}{\sqrt{N}} - \sqrt{(R_{GG}(0) - 2R_{GG}(\Delta t) + R_{GG}(2\Delta t))} & \text{для общего случая;} \end{cases} \quad (13)$$

$$AE2^* = \begin{cases} z_p \cdot \frac{\sqrt{(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))}}{\sqrt{N}} + \sqrt{(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))} & \text{для частного случая,} \\ z_p \cdot \frac{\sqrt{(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))}}{\sqrt{N}} + \sqrt{(R_{GG}(0) - 2R_{GG}(\Delta t) + R_{GG}(2\Delta t))} & \text{для общего случая;} \end{cases} \quad (14)$$

— для первой и второй точек по оси ординат:

$$OE^* = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2(R_{GG}(0) - R_{GG}(\Delta t))\pi e}} & \text{для частного случая,} \\ \frac{1}{\sqrt{2(R_{GG}(0) - 2R_{GG}(\Delta t) + R_{GG}(2\Delta t))\pi e}} & \text{для общего случая.} \end{cases} \quad (15)$$

### 3. Технологии раннего мониторинга технических объектов на основе анализа оценок плотности распределения помехи

Для обнаружения появления дефекта на ранней стадии необходимо создать банк данных, состоящий из оценок характеристик помехи, полученных в различные моменты времени  $t_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ . Для обработки этих данных предлагается следующий алгоритм.

1. В момент времени  $t_1$ , когда объект находится в нормальном режиме эксплуатации, по выражениям (7)–(15) вычисляются значения характеристик помехи  $D_{E_{t_1}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t_1}}^*$ ,  $m_{E_{t_1}}^*$ ,  $N_{t_1}^*(\varepsilon(i))$ ,  $N_{t_1, \max}^*(m_E^*)$ ,  $AE1_{t_1}^*$ ,  $AE2_{t_1}^*$ ,  $OE_{t_1}^*$ . Полученные значения заносятся в банк данных в виде информативных признаков:  $S_{t_1} = [D_{E_{t_1}}^* \ \sigma_{E_{t_1}}^* \ m_{E_{t_1}}^* \ N_{t_1}^*(\varepsilon(i)) \ N_{t_1, \max}^*(m_E^*) \ AE1_{t_1}^* \ AE2_{t_1}^* \ OE_{t_1}^*]$ , где отмечается, что в техническом состоянии объекта нет неисправностей. Данные значения фиксируются как характеристики помехи от внешнего воздействия и предполагается, что внешние помехи находятся в неизменном состоянии.

2. Затем аналогичные характеристики помехи  $D_{E_{t_2}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t_2}}^*$ ,  $m_{E_{t_2}}^*$ ,  $N_{t_2}^*(\varepsilon(i))$ ,  $N_{t_2, \max}^*(m_E^*)$ ,  $AE1_{t_2}^*$ ,  $AE2_{t_2}^*$ ,  $OE_{t_2}^*$  вычисляются в момент времени  $t_2$  и также заносятся в банк данных информативных признаков  $S_{t_2}$ .

Проводится анализ оценок помехи, полученных в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , и делаются выводы. Если  $D_{E_{t_1}}^* = D_{E_{t_2}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t_1}}^* = \sigma_{E_{t_2}}^*$ ,  $m_{E_{t_1}}^* = m_{E_{t_2}}^*$ ,  $N_{t_1}^*(\varepsilon(i)) = N_{t_2}^*(\varepsilon(i))$ ,  $N_{t_1, \max}^*(0) = N_{t_2, \max}^*(0)$ ,  $AE1_{t_1}^* = AE1_{t_2}^*$ ,  $AE2_{t_1}^* = AE2_{t_2}^*$ ,  $OE_{t_1}^* = OE_{t_2}^*$ , то это означает, что техническое состояние объекта стабильное и неисправности не наблюдаются.

Если  $D_{E_{t_1}}^* \neq D_{E_{t_2}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t_1}}^* \neq \sigma_{E_{t_2}}^*$ ,  $m_{E_{t_1}}^* \neq m_{E_{t_2}}^*$ ,  $N_{t_1}^*(\varepsilon(i)) \neq N_{t_2}^*(\varepsilon(i))$ ,  $N_{t_1, \max}^*(0) \neq N_{t_2, \max}^*(0)$ ,  $AE1_{t_1}^* \neq AE1_{t_2}^*$ ,  $AE2_{t_1}^* \neq AE2_{t_2}^*$ ,  $OE_{t_1}^* \neq OE_{t_2}^*$ , то имеется неисправ-

ность. Причем если  $D_{E_{t1}}^* > D_{E_{t2}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t1}}^* > \sigma_{E_{t2}}^*$ , то это означает, что имеется дефект, его следует выявить и провести ремонтные работы. Если  $D_{E_{t1}}^* \gg D_{E_{t2}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t1}}^* \gg \sigma_{E_{t2}}^*$ , то это означает, что появился дефект, который интенсивно развивается. Тогда для вектора информативных признаков  $S_{t2}$  устанавливается соответствие между значениями характеристик помехи и степенью этого вида дефекта.

3. Затем характеристики помехи  $D_{E_{t3}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t3}}^*$ ,  $m_{E_{t3}}^*$ ,  $N_{t3}^*(\varepsilon(i))$ ,  $N_{t3,\max}^*(m_E^*)$ ,  $AE1_{t3}^*$ ,  $AE2_{t3}^*$ ,  $OE_{t3}^*$  вычисляются в момент времени  $t_3$ ; полученные значения также заносятся в банк данных информативных признаков  $S_{t3}$ . Если  $D_{E_{t3}}^* \gg D_{E_{t2}}^*$ ,  $\sigma_{E_{t3}}^* \gg \sigma_{E_{t2}}^*$ , то это означает, что повреждение интенсивно развивается. Тогда в векторе информативных признаков этим значениям характеристик помехи ставится в соответствие состояние «быстро развивающаяся степень дефекта». В этом случае необходимо остановить работу оборудования во избежание возникновения аварии.

4. Затем характеристики помехи вычисляются в моменты времени  $t_4$ ,  $t_5$ , ...,  $t_n$ , и для каждого момента времени составляется банк информативных признаков  $S_{t4}$ ,  $S_{t5}$ , ...,  $S_{tn}$ . При этом для каждого из этих векторов устанавливается соответствие между значениями характеристик помехи и степенью развития данного вида дефекта. Составляется матрица информативных признаков динамики развития данного вида неисправности технического объекта:

$$S = \begin{pmatrix} D_{E_{t1}}^* & \sigma_{E_{t1}}^* & m_{E_{t1}}^* & N_{t1}^*(\varepsilon) & N_{t1,\max}^*(m_E^*) & AE1_{t1}^* & AE2_{t1}^* & OE_{t1}^* \\ D_{E_{t2}}^* & \sigma_{E_{t2}}^* & m_{E_{t2}}^* & N_{t2}^*(\varepsilon) & N_{t2,\max}^*(m_E^*) & AE1_{t2}^* & AE2_{t2}^* & OE_{t2}^* \\ D_{E_{t3}}^* & \sigma_{E_{t3}}^* & m_{E_{t3}}^* & N_{t3}^*(\varepsilon) & N_{t3,\max}^*(m_E^*) & AE1_{t3}^* & AE2_{t3}^* & OE_{t3}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ D_{E_{tn}}^* & \sigma_{E_{tn}}^* & m_{E_{tn}}^* & N_{tn}^*(\varepsilon) & N_{tn,\max}^*(m_E^*) & AE1_{tn}^* & AE2_{tn}^* & OE_{tn}^* \end{pmatrix}. \quad (16)$$

5. Для других видов дефектов составляются аналогичные матрицы информативных признаков динамики развития неисправностей технических объектов. Это дает возможность обнаружить момент возникновения дефекта и провести ранний мониторинг аварий.

#### 4. Примеры применения технологии раннего мониторинга технических объектов на основе анализа оценок плотности распределения помехи

**4.1. Технологии составления noise-матрицы раннего сейсмического мониторинга строительных объектов.** Проведение сейсмометрического мониторинга строительных объектов — чрезвычайно важная задача, так как даже при относительно слабых, но частых сейсмических воздействиях могут появиться визуально невидимые дефекты, приводящие к разрушению конструкции. Ниже предлагается следующий алгоритм раннего мониторинга. Составляется noise-матрица информативных признаков (16). Затем после каждого маломощного землетрясения начинается поиск возникшего дефекта и устанавливается соответствие между значениями характеристик помехи и видом дефекта. Одновременно в матрице влияния сейсмических воздействий на техническое состояние строительного объ-

екта выделяется  $i$ -я строка и отмечается тип и степень тяжести повреждения. Для этого к noise-матрице (16) добавляют еще два столбца, первый соответствует виду дефекта, а второй указывает на степень его повреждения. Виды дефекта записываются в закодированном виде: 1 — дефект несущей конструкции, в результате которого теряется прочность и устойчивость; 2 — дефект ограждающей конструкции, в результате которого сооружение ослабевает; 3 — дефект второстепенного элемента конструкции, в результате которого снижаются эксплуатационные характеристики сооружений; 4 — дефекты механического происхождения, например изменения грунтового основания, механические воздействия; 5 — дефекты физико-химического характера, например от коррозии, влажности, повышенной температуры и т.д. Таким образом, получают расширенную noise-матрицу технического состояния строительного объекта. При этом одному и тому же дефекту могут соответствовать различные степени повреждения: 1 — незначительная, 2 — слабая, 3 — средняя, 4 — сильная, 5 — полное разрушение:

$$\begin{pmatrix}
 D_{E_{t1}}^* & \sigma_{E_{t1}}^* & m_{E_{t1}}^* & N_{t1}^*(\varepsilon) & N_{t1}^*(m_E^*) & A1_{t1}^* & A2_{t1}^* & O_{t1}^* & 1 & 1 \\
 D_{E_{t2}}^* & \sigma_{E_{t2}}^* & m_{E_{t2}}^* & N_{t2}^*(\varepsilon) & N_{t2}^*(m_E^*) & A1_{t2}^* & A2_{t2}^* & O_{t2}^* & 1 & 2 \\
 D_{E_{t3}}^* & \sigma_{E_{t3}}^* & m_{E_{t3}}^* & N_{t3}^*(\varepsilon) & N_{t3}^*(m_E^*) & A1_{t3}^* & A2_{t3}^* & O_{t3}^* & 1 & 3 \\
 D_{E_{t4}}^* & \sigma_{E_{t4}}^* & m_{E_{t4}}^* & N_{t4}^*(\varepsilon) & N_{t4}^*(m_E^*) & A1_{t4}^* & A2_{t4}^* & O_{t4}^* & 1 & 4 \\
 D_{E_{t5}}^* & \sigma_{E_{t5}}^* & m_{E_{t5}}^* & N_{t5}^*(\varepsilon) & N_{t5}^*(m_E^*) & A1_{t5}^* & A2_{t5}^* & O_{t5}^* & 1 & 5 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 D_{E_{t1}}^* & \sigma_{E_{t1}}^* & m_{E_{t1}}^* & N_{t1}^*(\varepsilon) & N_{t1}^*(m_E^*) & A1_{t1}^* & A2_{t1}^* & O_{t1}^* & n & 1 \\
 D_{E_{t,n+1}}^* & \sigma_{E_{t,n+1}}^* & m_{E_{t,n+1}}^* & N_{t,n+1}^*(\varepsilon) & N_{t,n+1}^*(m_E^*) & A1_{t,n+1}^* & A2_{t2}^* & O_{t,n+1}^* & n & 2 \\
 D_{E_{t,n+2}}^* & \sigma_{E_{t,n+2}}^* & m_{E_{t,n+2}}^* & N_{t,n+2}^*(\varepsilon) & N_{t,n+2}^*(m_E^*) & A1_{t,n+2}^* & A2_{t3}^* & O_{t,n+2}^* & n & 3 \\
 D_{E_{t,n+3}}^* & \sigma_{E_{t,n+3}}^* & m_{E_{t,n+3}}^* & N_{t,n+3}^*(\varepsilon) & N_{t,n+3}^*(m_E^*) & A1_{t,n+3}^* & A2_{t4}^* & O_{t,n+3}^* & n & 4 \\
 D_{E_{t,n+4}}^* & \sigma_{E_{t,n+4}}^* & m_{E_{t,n+4}}^* & N_{t,n+4}^*(\varepsilon) & N_{t,n+4}^*(m_E^*) & A1_{t,n+4}^* & A2_{t5}^* & O_{t,n+4}^* & n & 5
 \end{pmatrix} \quad (17)$$

После каждого маломощного землетрясения проводится анализ технического состояния строительного сооружения, и система мониторинга выдает сообщение о мерах, которые необходимо предпринять в данном конкретном случае: 1 — ремонт не требуется; 2 — необходим текущий ремонт; 3 — провести капитальный ремонт; 4 — заменить поврежденную строительную конструкцию; 5 — разобрать и усилить строительную конструкцию.

**4.2. Технологии составления noise-таблицы начала аварий в системе контроля буровых установок.** В настоящее время для управления процессом бурения создаются системы контроля установки (СКУ). Однако существующие технологии контроля не обеспечивают бурильщика информацией, позволяющей выявить начальный скрытый период возникновения аварий. Чаще всего этот момент устанавливается буровым мастером интуитивно.

Ниже предлагается технология определения ранней стадии зарождения дефекта с помощью характеристик (7)–(15) помехи. Пусть от датчиков, установленных на столе ротора, наверху буровой вышки и середине каркаса станка, поступают вибрационные сигналы  $GV_1(t)$ ,  $G_2V(t)$ ,  $G_3V(t)$ , которые возникли от крутильной, осевой и боковой вибраций, и передаются в компьютер. В компьютере



по формулам (7)–(15) для каждого сигнала вычисляются характеристики помехи, строится график плотности распределения помехи, которые затем выдаются на экран:  $\Delta T$ , мин:  $D_{E_t}^*$ ,  $\sigma_{E_t}^*$ ,  $m_{E_t}^*$ ,  $N_t^*(\varepsilon(i))$ ,  $N_{t,\max}^*(m_{E_t}^*)$ ,  $A1_t^*$ ,  $A2_t^*$ ,  $O_t^*$ .

При изменении технического состояния буровой установки меняются значения среднего квадратического отклонения помехи и ее математическое ожидание. Естественно, что при увеличении значения среднего квадратического отклонения помехи максимум плотности распределения уменьшается, кривая приобретает более плоскую форму. При изменении значения математического ожидания помехи график плотности распределения помехи перемещается вдоль оси абсцисс. При изменении формы кривой распределения меняются координаты точек перегиба. В зависимости от значений характеристик помехи для каждого отдельного зашумленного сигнала система сначала формирует предварительное решение о состоянии буровой установки. Затем, анализируя значения характеристик помехи для всех зашумленных сигналов в совокупности, система выносит окончательное решение. При этом для всех сигналов выдаются графики кривых плотности распределения с отмеченными точками перегиба и максимумами. Эти графики сравниваются с графиками, полученными при нормальном функционировании объекта. Этим самым система оповещает о произошедших изменениях и дает возможность буровому мастеру более наглядно в этом убедиться. Одновременно система ставит в известность бурового мастера о степени повреждения: 1 — повреждение незначительное и возрастает неинтенсивно и неравномерно; 2 — повреждение неощутимое и развивается с небольшой интенсивностью; 3 — повреждение ощутимое и развивается ускоренно; 4 — повреждение сильное и характеризуется интенсивным развитием.

**4.3. Технологии выявления ранней стадии возникновения неисправностей объектов теплоснабжения.** Известно, что одна из основных подсистем энергетики — теплоснабжение. Для эффективного и надежного функционирования объектов теплоснабжения часто разрабатываются и внедряются системы автоматизации, которые осуществляют контроль и сигнализацию отклонения параметров, контроль за техническим состоянием трубопроводов, оперативное оповещение о режимах работы тепловых сетей, мониторинг и контроль состояния оборудования котлов и общекотельного оборудования, планирование ремонтных работ и оперативное реагирование на возникающие неполадки и т.д. без останова работы самого объекта на капитальный ремонт. Разработанные алгоритмы вычисления характеристик помехи (7)–(15) рекомендуется также применить для выявления ранней стадии возникновения неисправностей объектов теплоснабжения. Это особенно важно, например, при транспортировке газа или другого горючего вещества.

### Заключение

Технологии мониторинга технических объектов дают возможность по комбинациям оценок среднего квадратического отклонения, математического ожидания, плотности распределения, ее максимума и точек перегиба помехи каждого зашумленного сигнала в отдельности, а также всех поступающих сигналов вместе определить начальный период зарождения и динамику развития неисправности, причем для каждого отдельно промышленного объекта применение предложенной технологии следует применять с учетом специфики исследуемого объекта [2–15, 20].

*T.A. Aliev, N.F. Musaeva*

## ТЕХНОЛОГІЇ РАННЬОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОЦІНОК ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ ЗАВАД

Показано, що технологія моніторингу технічних об'єктів із застосуванням комбінацій оцінок середнього квадратичного відхилення, математичного очікування, щільності розподілу, її максимуму і точок перегину завади кожного зашумленого сигналу окремо, а також всіх сигналів, що надходять, дають можливість визначити початковий період зародження несправності і динаміку її розвитку. Розглянуто специфіку застосування щільності розподілу завади зашумленого сигналу при відмінному від нуля математичному очікуванні для раннього моніторингу аварій різних технічних об'єктів.

**Ключові слова:** завада з відмінним від нуля математичним очікуванням, зашумлений сигнал, щільність розподілу, система контролю, діагностика моніторингу.

*T.A. Aliev, N.F. Musaeva*

## TECHNOLOGIES FOR EARLY MONITORING OF TECHNICAL OBJECTS USING THE ESTIMATES OF NOISE DISTRIBUTION DENSITY

It is shown that the technologies for monitoring technical objects using combinations of estimates of the mean square deviation, mathematical expectation, distribution density, its maximum and inflection points of each noisy signal separately and of all incoming signals together make it possible to determine the initial period of initiation of malfunction and the dynamics of its development. The specifics of using the noise distribution density of a noisy signal with a non-zero mathematical expectation for early monitoring of accidents of various technical objects are considered.

**Keywords:** Noise with non-zero mathematical expectation, noisy signal, distribution density, control, diagnostics and monitoring system.

1. Aliev T. Noise control of the beginning and development dynamics of accidents. Switzerland : Springer. 2019. 201 p. DOI: 10.1007/978-3-030-12512-7
2. Aliev T.A. Digital noise monitoring of defect origin. New York : Springer. 2007. 223 p. DOI: 10.1007/978-0-387-71754-8
3. Aliev T.A., Musaeva N.F., Suleymanova M.T. Density function of noise distribution as an indicator for identifying the degree of fault growth in sucker rod pumping unit (SRPU). *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. **49**, N 4. P. 1–11. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i4.10
4. Position-binary technology for processing the signals of a load for identification of the technical state of deep-well sucker-rod pumps. T.A. Aliev, O.G. Nusratov, G.A. Guluev, As.G. Rzaev, F.G. Pashaev, M.G. Rezvan. *Measurement Techniques*. 2018. **61**, N 9. P. 885–890. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1519-x>
5. Алиев Т.А., Мусаева Н.Ф., Сулейманова М.Т., Газызаде Б.И. Чувствительные алгоритмы выявления степени развития неисправности штанговой глубинной насосной установки. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. **18**, № 2. С. 94–102. DOI: 10.17587/mau.18.91-102
6. Aliev T.A., Musaeva N.F. An algorithm for eliminating microerrors of noise in the solution of statistical dynamics problems. *Automation and remote control*. 1998. **59** (2), N 5. P. 679–688.

7. Aliev T.A., Musaeva N.F., Suleymanova M.T., Gazizade B.I. Analytic representation of the density function of normal distribution of noise. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2015. **47**(8), N 4. P. 24–40. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i8.30
8. Aliev T.A., Musaeva N.F., Suleymanova M.T., Gazizade B.I. Technology for calculating the parameters of the density function of normal distribution of the useful component in a noisy process. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. **48**, N 4. P. 35–55. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.50
9. Aliev T.A., Musaeva N.F., Gazizade B.I. Algorithms of building a model of the noisy process by correction of the law of its distribution. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. **49**, N 9. P. 61–75. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i9.50
10. Aliev T.A., Musaeva N.F., Suleymanova M.T. Algorithms for Indicating the Beginning of Accidents Based on the Estimate of the Density Distribution Function of the Noise of Technological Parameters. *Automatic Control and Computer Science*. 2018. **52**, N 3. P. 231–242. DOI: 10.3103/S0146411618030021
11. Musaeva N.F. Robust method of estimation with «contaminated» coarse errors. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2003. **37**, N 6. P. 50–63. [https:// elibrary.ru/contents.asp?id=33405883](https://elibrary.ru/contents.asp?id=33405883)
12. Aliev T.A., Musaeva N.F. Statistical identification with error balancing. *Journal of computer and systems sciences international*. 1996. **34**, N 5. P. 119–124
13. Aliev T.A., Musaeva N.F. Algorithms for improving adequacy of statistical identification. *Journal of computer and systems sciences International*, 1997. **36**, N 3. P. 363–369. <https://www.tib.eu/en/search/id/olc%3A1518633188/Algorithms-for-Improving-Adequacy-of-Statistical>
14. Aliev T.A., Musaeva N.F., Gazizade B.I. Algorithm of application of high-order moments of the useful component as a diagnostic indicator of changes in the technical state. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. **50**, N 11. P. 29-43. [https:// DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v50.i11.30](https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i11.30)
15. Aliev T.A., Musaeva N.F., Gazizade B.I. Algorithms for calculating high-order moments of the noise of noisy signals. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018. **50**, N 6. P. 1–13. [https:// DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v50.i6.10](https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i6.10)
16. Техническая кибернетика. Кн. 2. Под ред. В.В. Солодовникова. М. : Машиностроение, 1967. 496 с.
17. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. 5-е изд. М. : КНОРУС, 2013. 448 с.
18. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд. М. : Физматлит, 2002. 398 с.
19. Иванова В.М., Калинина В.Н., Нешумова Л.А., Решетникова И.О. Математическая статистика. М. : Высшая шк., 1975. 398 с.
20. Abbasov A.M., Mamedova M.H., Orujov G.H., Aliyev H.B. Synthesis of the methods of subjective knowledge representations in problems of fuzzy pattern recognition. *Mechatronics*. 2001. N 11. P. 439–449.

*Получено 18.06.2019*