

УДК 519.216

Т.А. АЛИЕВ, Н.Ф. МУСАЕВА, Н.Э. РЗАЕВА, У.Э. САТТАРОВА

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ МАТРИЦ, ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

Анализируются трудности формирования корреляционных матриц зашумленных входных-выходных сигналов производственных объектов. Предложены алгоритмы вычисления оценки характеристик помехи и технологии формирования корреляционных матриц, эквивалентных матрицам полезных сигналов зашумленных случайных процессов. При этом учтены специфики непрерывных стохастических линейных объектов. Показана возможность применения предложенной технологии для создания системы мониторинга начала скрытого периода аварий на стационарных морских платформах.

Ключевые слова: объекты контроля, техническое состояние, морская платформа, корреляционная матрица, корреляционная функция, помеха, зашумленные сигналы, мониторинг

1. Введение. В современной теории и практике управления [1-11] — построение математической модели объекта управления по результатам обработки экспериментальных данных наблюдений является актуальной проблемой. Это связано с тем, что в настоящее время технология построения адекватных и эффективных моделей динамических объектов, используемых для автоматизации управления, контроля и диагностики технических объектов и технологических процессов, находит свое применение во всех областях промышленности, энергетики и транспорта.

На данный момент насчитывается большое число работ, посвященных проблеме идентификации объектов управления [10-19]. Однако, несмотря на высокий уровень теоретических исследований, а также полученные интересные и содержательные результаты, опыт успешного практического их применения при построении математических моделей реальных динамических объектов невелик.

В инженерной практике широкое применение находят статистические методы идентификации, при которой динамические характеристики объекта управления определяются на основе анализа статистических характеристик его входного и выходного сигналов [1-4].

Однако при идентификации реальных объектов управления на полезный сигнал, который должен быть получен с наименьшими искажениями, накладываются помехи, имеющие случайное происхождение и затрудняющие процесс вычисления оценок статических характеристик сигнала.

В целях устранения влияния помех на результат статистической идентификации динамики объекта предложены многочисленные алгоритмы и технологии фильтрации [1-3], позволяющие устранять погрешность помех, возникающих от влияния внешних факторов [6, 7]. Следует отметить, что в процессе нормального функционирования реальных объектов управления помехи формируются под влиянием различных факторов, в частности, отражающих процессы зарождения каких-либо дефектов в объекте. В связи с этим спектр помехи часто пересекается со спектром полезного сигнала, причем данные спектры не являются стабильными. В результате фильтрация не всегда обеспечивает желаемый результат: иногда она приводит даже к искажению спектра полезного сигнала [8-11].

В данной статье рассматривается один из возможных вариантов создания альтернативных методов и технологий устранения погрешностей, вызванных влиянием помехи при формировании корреляционных матриц в процессе решения задачи статистической идентификации динамической модели объекта управления.

2. Постановка задачи. Известно, что для идентификации линейного одномерного стационарного динамического объекта управления требуется в нормальном режиме его эксплуатации по результатам измерения эргодических входного $X(t)$ и выходного $Y(t)$ сигналов определить импульсную переходную характеристику $W(t)$. Известно, что для этого следует решить систему линейных алгебраических уравнений, которая в матричной форме имеет следующий вид [1-3]:

$$\bar{R}_{YX} = \bar{R}_{XX} \bar{W} \Delta \tau, \quad (2.1)$$

где \bar{R}_{XX} — квадратная $m \times m$ симметричная матрица автокорреляционных функций центрированного входного сигнала $X(t)$:

$$\bar{R}_{XX} = \begin{bmatrix} R_{XX}(0) & R_{XX}(\Delta \tau) & \dots & R_{XX}[(m-1)\Delta \tau] \\ R_{XX}(\Delta \tau) & R_{XX}(0) & \dots & R_{XX}[(m-2)\Delta \tau] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{XX}[(m-1)\Delta \tau] & R_{XX}[(m-2)\Delta \tau] & \dots & R_{XX}(0) \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

\bar{R}_{YX} — матрица-столбец взаимно корреляционных функций между входом $X(t)$ и выходом $Y(t)$:

$$\bar{R}_{YX} = [R_{YX}(0) \quad R_{YX}(\Delta \tau) \quad \dots \quad R_{YX}[(m-1)\Delta \tau]]^T \quad (2.3)$$

\bar{W} — матрица-столбец, элементами которого являются ординаты искомой импульсной переходной функции:

$$\bar{W} = [W(0) \quad W(\Delta \tau) \quad \dots \quad W[(m-1)\Delta \tau]]^T.$$

Матрицы корреляционных функций (2.2), (2.3) сформированы из оценок полезных сигналов $X(t)$ и $Y(t)$.

Так как рассматриваемые процессы $X(t)$ и $Y(t)$ являются эргодическими, то каждая реализация случайного процесса достаточной продолжительности несет практически полную информацию о свойствах всего ансамбля реализаций, что позволяет упростить процедуру определения статистических характеристик, заменяя усреднение значений по ансамблю реализаций усреднением значений одной реализации за длительный интервал времени. Поэтому корреляционные функции вычисляются по формулам:

$$R_{XX}(\mu) = M[X(t)X(t + \mu\Delta t)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X(i\Delta t)X(i\Delta t + \mu\Delta t), \quad n = N - k\mu,$$

$$\bar{R}_{YX} = M[Y(t)X(t + \mu\Delta t)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y(i\Delta t)X(i\Delta t + \mu\Delta t).$$

Здесь приняты следующие обозначения. Пусть интервал времени $[0, T]$ состоит из N весьма малых интервалов Δt , то есть $T = N\Delta t$. Придадим t дискретные значения, кратные Δt , то есть $t = \mu\Delta t$, $\mu = \overline{0, N}$, и введем обозначения для оценок корреляционных функций: $R_{gg}(\mu\Delta t) = R_{gg}(\mu)$; $R_{XX}(\mu\Delta t) = R_{XX}(\mu)$, $R_{g\eta}(\mu\Delta t) = R_{g\eta}(\mu)$; $R_{XY}(\mu\Delta t) = R_{XY}(\mu)$. Так как при решении уравнения (2.1), которое является некорректным, малые Δt и большие значения N приводят к большим ошибкам, то для составления матриц корреляционные функции вычисляются для значений, дискретизированных шагом $\Delta \tau = k\Delta t$, k — целое положительное число.

Поскольку в реальности сигналы искажены помехами, то зашумленные входной $g(t)$ и

выходной $\eta(t)$ сигналы объекта представляют собой сумму полезных сигналов $X(t)$ и $Y(t)$ соответствующих помех $\varepsilon(t)$ и $\varphi(t)$, т.е.

$$\begin{aligned} g(t) &= X(t) + \varepsilon(t), \\ \eta(t) &= Y(t) + \varphi(t). \end{aligned}$$

Тогда матричное уравнение (2.1) можно представить в виде

$$\vec{R}_{\eta g} = \vec{R}_{gg} \vec{W} \Delta \tau,$$

где

$$\vec{R}_{gg} = \begin{bmatrix} R_{gg}(0) & R_{gg}(\Delta \tau) & \dots & R_{gg}[(m-1)\Delta \tau] \\ R_{gg}(\Delta \tau) & R_{gg}(0) & \dots & R_{gg}[(m-2)\Delta \tau] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{gg}[(m-1)\Delta \tau] & R_{gg}[(m-2)\Delta \tau] & \dots & R_{gg}(0) \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

$$\vec{R}_{\eta g} = [R_{\eta g}(0) \quad R_{\eta g}(\Delta \tau) \quad \dots \quad R_{\eta g}[(m-1)\Delta \tau]]^T. \quad (2.5)$$

Здесь

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &= M[g(t)g(t + \mu\Delta t)] \\ R_{\eta g}(\mu) &= M[\eta(t)g(t + \mu\Delta t)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

На практике корреляционные матрицы (2.4), (2.5) формируются по оценкам $R_{gg}(\mu)$, $R_{\eta g}(\mu)$ корреляционных функций зашумленных сигналов $g(t)$ и $\eta(t)$.

Однако при этом возникают очевидные неравенства

$$\left. \begin{aligned} \vec{R}_{XX} &\neq \vec{R}_{gg} \\ \vec{R}_{YX} &\neq \vec{R}_{\eta g} \end{aligned} \right\}$$

В результате во многих случаях обеспечить адекватность идентификации модели динамики объекта управления не удастся.

В то же время на многих реальных объектах управления для измерения зашумленных сигналов применяются различные датчики, у которых входные и выходные сигналы представляют собой различные физические величины. В этих случаях оценки корреляционных функций сигналов $X(t)$ и $Y(t)$ приводятся к безразмерным величинам, причем их нормированные авто- и взаимокорреляционные функции вычисляются по известным формулам [1-3, 10]

$$\left. \begin{aligned} r_{XX}(\mu) &= R_{XX}(\mu) / D_X; \\ r_{YX}(\mu) &= R_{YX}(\mu) / \sqrt{D_X D_Y} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

где $D_X = R_{XX}(0)$, $D_Y = R_{YY}(0)$ – дисперсии полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$ соответственно.

Нормированные корреляционные матрицы полезных сигналов имеют вид:

$$\vec{r}_{XX} = \begin{bmatrix} 1 & r_{XX}(\Delta \tau) & \dots & r_{XX}[(m-1)\Delta \tau] \\ r_{XX}(\Delta \tau) & 1 & \dots & r_{XX}[(m-2)\Delta \tau] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{XX}[(m-1)\Delta \tau] & r_{XX}[(m-2)\Delta \tau] & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\vec{r}_{YX} = [r_{YX}(0) \quad r_{YX}(\Delta \tau) \quad \dots \quad r_{YX}[(m-1)\Delta \tau]]^T. \quad (2.9)$$

Нормированные авто- и взаимокорреляционные функции $r_{gg}(\mu)$, $r_{\eta g}(\mu)$ зашумленных сигналов $g(t)$, $\eta(t)$, состоящих из суммы случайных полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$ и соответствующих помех $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$ вычисляются по формулам [1-3, 10]:

$$\left. \begin{aligned} r_{gg}(\mu) &= R_{gg}(\mu) / D_g \\ r_{\eta g}(\mu) &= R_{\eta g}(\mu) / \sqrt{D_g D_\eta} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

При этом соответствующие нормированные корреляционные матрицы зашумленных сигналов $g(t)$, $\eta(t)$ представляются в следующем виде [1-3, 10]:

$$\bar{r}_{gg} = \begin{bmatrix} 1 & r_{gg}(\Delta\tau) & \dots & r_{gg}[(m-1)\Delta\tau] \\ r_{gg}(\Delta\tau) & 1 & \dots & r_{gg}[(m-2)\Delta\tau] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{gg}[(m-1)\Delta\tau] & r_{gg}[(m-2)\Delta\tau] & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

$$\bar{r}_{\eta g} = [r_{\eta g}(0) \quad r_{\eta g}(\Delta\tau) \quad \dots \quad r_{\eta g}[(m-1)\Delta\tau]]^T. \quad (2.12)$$

Сравнивая матрицы (2.8), (2.9) и (2.11), (2.12) нетрудно убедиться, что имеют место неравенства:

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_{gg} &\neq \bar{r}_{XX} \\ \bar{r}_{\eta g} &\neq \bar{r}_{YX} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Из неравенств (2.13) следует, что корреляционные матрицы (2.4), (2.5) и (2.11), (2.12) отличаются от исходных корреляционных матриц (2.2), (2.3) и (2.8), (2.9). Именно поэтому на практике обеспечение адекватности идентификации динамической модели объекта на основе этих матриц часто не удается. В связи с вышеизложенным в рассматриваемой работе требуется решение вопросов, связанных с созданием алгоритмов и технологий формирования эквивалентных корреляционных матриц \bar{R}_{gg}^e , $\bar{R}_{g\eta}^e$, \bar{r}_{gg}^e , $\bar{r}_{g\eta}^e$, обеспечивающих выполнение равенств

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{gg}^e &= \bar{R}_{XX} \\ \bar{R}_{g\eta}^e &= \bar{R}_{YX} \\ \bar{r}_{gg}^e &= \bar{r}_{XX} \\ \bar{r}_{g\eta}^e &= \bar{r}_{YX} \end{aligned} \right\}.$$

3. Технологии формирования эквивалентных корреляционных матриц при отсутствии корреляции между полезным сигналом и помехой. Проведенные исследования [12-14] показали, что для входных и выходных зашумленных сигналов многих объектов управления выполняются условия стационарности и нормальности закона распределения. Рассмотрим случай, когда отсутствует корреляции между полезными сигналами $X(t)$, $Y(t)$ и помехами, а также между самими $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$, т. е.

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(\tau) &= 0 \\ R_{Y\varphi}(\tau) &= 0 \\ R_{\varepsilon\varphi}(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ при любом } \tau. \quad (3.1)$$

Кроме того, на практике для реальных технологических объектов, например, для сигналов, получаемых на выходе датчиков вибрации и акустических датчиков, используемых на морских платформах и др. промышленных объектов, выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} R_{\infty}(\tau) = 0 \\ R_{\varphi\varphi}(\tau) = 0 \end{aligned} \right\} \text{при } \tau \neq 0,$$

$$\left. \begin{aligned} R_{\infty}(\tau) = D_{\varepsilon} \\ R_{\varphi\varphi}(\tau) = D_{\varphi} \end{aligned} \right\} \text{при } \tau = 0.$$

Тогда выражения (1.6) вычисления для оценок авто- и взаимокорреляционных функций можно представить в виде

$$R_{gg}(\mu) = M[g(t)g(t + \mu\Delta t)] = \begin{cases} R_{XX}(0) + D_{\varepsilon} & \text{при } \mu = 0 \\ R_{XX}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0 \end{cases}, \quad (3.2)$$

$$R_{\eta g}(\mu) = M[\eta(t)g(t + \mu\Delta t)] = M[[Y(t) + \varphi(t)][X(t + \mu\Delta t) + \varepsilon(t + \mu\Delta t)]] = R_{YX}(\mu). \quad (3.3)$$

Следовательно, принимая во внимание, что согласно выражению (3.2) $R_{XX}(0) = R_{gg}(0) - D_{\varepsilon}$, корреляционную матрицу $\bar{R}_{gg}^e(\mu)$ (2.4) зашумленного сигнала $g(t)$, эквивалентную матрице, представленной в формуле (2.2), можно представить в виде:

$$\bar{R}_{gg}^e(\mu) = \bar{R}_{gg} - D_{\varepsilon} E = \bar{R}_{XX}. \quad (3.4)$$

На основе выражения (3.3) матрицу (2.5) можно представить в виде эквивалентной корреляционной матрицы (2.3)

$$\bar{R}_{\eta g}^e = \bar{R}_{YX}. \quad (3.5)$$

Экспериментальные исследования также показали, что для объектов, удовлетворяющих условиям (3.1), определяя оценки элементов $R_{\eta g}(\mu)$ по выражению (3.3), удается формировать эквивалентную матрицу $\bar{R}_{\eta g}^e$ (3.5), элементы которых совпадают с элементами корреляционной матрицы (2.3) $\bar{R}_{YX}(\mu)$ полезных сигналов $X(t)$, $Y(t)$.

Однако корреляционная матрица (2.4) \bar{R}_{gg} зашумленного входного сигнала $g(t)$ отличается от корреляционной матрицы $R_{XX}(\mu)$ (2.2) полезного сигнала $X(t)$ диагональными элементами, представляющими собой сумму оценок корреляционной функции полезных сигналов $R_{XX}(0)$ и дисперсии помехи D_{ε} . Поэтому на практике для формирования эквивалентной матрицы $\bar{R}_{gg}^e(\mu)$ (3.4) необходимо корректировать оценки $R_{gg}(0)$ диагональных элементов матрицы (2.4).

Следовательно, формирование матрицы (3.4), эквивалентной матрице (2.2), сводится к устранению погрешностей помех D_{ε} из диагональных элементов матрицы (2.4).

Кроме того, при нормировании оценок корреляционных функций также требуется определение D_{ε} . Это связано с тем, что при этом, принимая во внимание выражения (3.2), формулы (2.10) можно преобразовать к виду, аналогичному формуле (2.7), т.е.

$$\frac{R_{XX}(\mu \neq 0)}{D_X} = \frac{R_{gg}^e(\mu \neq 0)}{D_g - D_{\varepsilon}} = r_{gg}^e(\mu \neq 0); \quad (3.6)$$

$$\frac{R_{YX}(\mu)}{\sqrt{D_X D_Y}} = \frac{R_{\eta g}(\mu)}{\sqrt{(D_g - D_{\varepsilon})(D_{\eta} - D_{\varphi})}} = r_{\eta g}^e(\mu). \quad (3.7)$$

При этом, нормированную корреляционную матрицу зашумленных сигналов $g(t)$ (2.11), эквивалентную матрице (2.8), можно представить в виде:

$$\vec{r}_{gg}^e = \begin{bmatrix} 1 & r_{gg}^e(\Delta\tau) & \dots & r_{gg}^e[(m-1)\Delta\tau] \\ r_{gg}^e(\Delta\tau) & 1 & \dots & r_{gg}^e[(m-2)\Delta\tau] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{gg}^e[(m-1)\Delta\tau] & r_{gg}^e[(m-2)\Delta\tau] & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Аналогичным образом также можно сформировать из (2.12) матрицу, эквивалентную матрице нормированных взаимно корреляционных функций (2.9), т.е.

$$\vec{r}_{\eta g}^e = [r_{\eta g}^e(0) \quad r_{\eta g}^e(\Delta\tau) \quad \dots \quad r_{\eta g}^e[(m-1)\Delta\tau]]. \quad (3.9)$$

Таким образом, согласно выражениям (3.2)-(3.9), устраняя погрешности помех D_ε , D_φ из соответствующих элементов матриц зашумленных сигналов, можно формировать корреляционные матрицы (3.4), (3.5), (3.8), (3.9), которые будут эквивалентными соответствующим матрицам (2.2), (2.3), (2.8), (2.9) полезных сигналов. Однако для этого необходимо определение оценок дисперсии помех D_ε и D_φ зашумленных сигналов $g(t)$ и $\eta(t)$. Проведенные исследования показали, что для этой цели целесообразно применение следующих выражений, которое вычисляется для достаточно малого Δt , выбранного, исходя из спектра помехи [12-14]:

$$\begin{aligned} D_\varepsilon &= M[g(t)g(t) - 2g(t)g(t + \Delta t) + g(t)g(t + 2\Delta t)] \\ D_\varphi &= M[\eta(t)\eta(t) - 2\eta(t)\eta(t + \Delta t) + \eta(t)\eta(t + 2\Delta t)] \end{aligned}, \quad (3.10)$$

которые позволяют вычислить оценки дисперсий D_ε , D_φ помех $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$ зашумленных сигналов $g(t)$, $\eta(t)$.

Целесообразность применения этих формул при вычислении оценок D_ε , D_φ можно показать разложением их правой части на слагаемые, т.е. [12-14]:

$$\begin{aligned} R'_{X\varepsilon}(\mu=0) &= M[g(t)g(t) - 2g(t)g(t + \Delta t) + g(t)g(t + 2\Delta t)], \\ R'_{X\varepsilon}(\mu=0) &= M[(X(t) + \varepsilon(t))(X(t) + \varepsilon(t)) - 2M[(X(t) + \varepsilon(t))(X(t + \Delta t) + \varepsilon(t + \Delta t))] + \\ &\quad + M[(X(t + 2\Delta t) + \varepsilon(t + 2\Delta t))] = \\ &= R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) - 2R_{XX}(\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(\Delta t) - \\ &\quad - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t). \end{aligned}$$

При выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов рассматриваемых объектов, принимая во внимание равенство (3.1), можно считать справедливыми равенства [12-14]:

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(0) = R_{\varepsilon X}(0) = R_{X\varepsilon}(\Delta t) = R_{\varepsilon X}(\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) = R_{X\varepsilon}(2\Delta t) = R_{\varepsilon X}(2\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) = 0 \\ R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) = 0 \end{aligned} \right\}.$$

Справедливость этих равенств связана с тем, что на практике для таких инфра низкочастотных медленно протекающих технологических процессов как нефтепереработка, нефтехимия, и т.д., в нашем случае шаг дискретизации Δt выбирается исходя из высокочастотных спектров помехи $\varepsilon(t)$, которая возникает в результате различных неисправностей. При этом, если T составляет, например, 30-50 часов, то Δt составляет секунды или минуты (в зависимости от специфики исследуемого процесса). В этом случае вышеизложенное равенство можно считать строгим. Естественно, что оно справедливо не для всех реальных процессов [3, 10, 15].

Следовательно, благодаря вышеизложенному, в правой части формулы (3.10) получим

$$R'_{X\varepsilon}(\mu=0) = M[\varepsilon(t)\varepsilon(t)] = D_{\varepsilon} = D_{\varepsilon}.$$

Это показывает, что полученная по формуле (3.10) оценка действительно представляет собой оценку дисперсии помехи D_{ε} . Благодаря этому после коррекции соответствующих элементов матриц (3.4), (3.5), (3.8), (3.9) их можно считать эквивалентными матрицам (2.2), (2.3) и (2.8), (2.9) соответственно.

Например, после вычитания оценки D_{ε} из оценки диагональных элементов $R_{gg}(0)$ матрицы (2.4) оценки всех ее элементов становятся равными соответствующим оценкам матрицы (2.2) полезных сигналов.

Таким образом, возможность вычисления оценок дисперсии помехи D_{ε} , D_{φ} зашумленных сигналов $g(t)$, $\eta(t)$ позволяет формировать эквивалентные матрицы \bar{R}_{gg}^e , $\bar{R}_{\eta g}^e$, \bar{r}_{gg}^e , $\bar{r}_{\eta g}^e$, у которых оценки элементов соответственно равны оценкам элементов матриц \bar{R}_{XX} , \bar{R}_{YX} , \bar{r}_{XX} , \bar{r}_{YX} полезных сигналов. Следовательно, при отсутствии корреляции между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$, $Y(t)$ и $\varphi(t)$ можно считать, что между матрицами полезных сигналов и эквивалентными матрицами зашумленных сигналов имеют места равенства

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{gg}^e &= \bar{R}_{XX} \\ \bar{R}_{\eta g}^e &= \bar{R}_{YX} \\ \bar{r}_{gg}^e &= \bar{r}_{XX} \\ \bar{r}_{\eta g}^e &\neq \bar{r}_{YX} \end{aligned} \right\}.$$

4. Технология формирования эквивалентной корреляционной матрицы при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой. Как было указано выше реальным производственным объектам в процессе эксплуатации характерно переходить в скрытый период зарождения различных дефектов, таких как износ, микротрещина, нагарообразование, деформация от усталости и т.д. Обычно все это отражается на сигналах, получаемых от соответствующих датчиков в виде шумов $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$, которые в большинстве случаев имеет корреляцию с полезными сигналами $X(t)$, $Y(t)$ [18, 19]. Из-за этого в таких случаях суммарная помеха формируется из помехи $\varepsilon_1(t)$, которая возникает от влияния внешних факторов и из шума $\varepsilon_2(t)$, который возникает в результате зарождения различных дефектов. При этом дисперсия зашумленного сигнала имеет вид:

$$D_g = R_{gg}(0) = M[g(t)g(t)] = M[X(t)X(t)] + 2M[X(t)\varepsilon(t)] + M[\varepsilon(t)\varepsilon(t)] = R_{XX}(0) + 2R_{\varepsilon X}(0) + D_{\varepsilon}.$$

Следовательно, когда суммарная помеха

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$$

имеет корреляцию с полезным сигналом $X(t)$, ее дисперсия D_{ε} определяется по выражению

$$D_{\varepsilon} = 2R_{X\varepsilon}(0) + D_{\varepsilon}.$$

В этом случае формулу определения оценки $R_{gg}(\mu)$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &= M[g(t)g(t+\mu\Delta t)] = M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+\mu\Delta t)+\varepsilon(t+\mu\Delta t))] = \\ &= M[X(t)X(t+\mu\Delta t)] + M[X(t)\varepsilon(t+\mu\Delta t)] + M[\varepsilon(t)X(t+\mu\Delta t)] + M[\varepsilon(t)\varepsilon(t+\mu\Delta t)] = \end{aligned}$$

$$= R_{XX}(\mu) + R_{\varepsilon X}(\mu) + R_{X\varepsilon}(\mu) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \begin{cases} R_{XX}(0) + 2R_{X\varepsilon}(0) + D_{\varepsilon} & \text{при } \mu = 0 \\ R_{XX}(\mu) + 2R_{X\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu \neq 0 \end{cases}.$$

Экспериментальные исследования показали, что в этом случае в реальных производственных объектах достаточно часто между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ имеет место корреляция даже в течение нескольких шагов дискретизации, т.е. при $\mu = \overline{0, N}$ [18, 19]. Поэтому для формирования эквивалентных матриц необходима разработка технологии определения оценок $R_{X\varepsilon}(\mu)$, $\mu = \overline{0, N}$ взаимно корреляционных функций между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$. При этом путем компенсации погрешностей элементов $R_{gg}(\mu)$, $\mu = \overline{0, N}$ в соответствующих строках и столбцах корреляционных матриц (2.4), (2.11) можно обеспечить их эквивалентность с матрицами полезных сигналов (2.2), (2.8). Следовательно, в этом случае для того, чтобы корреляционные матрицы (2.4) были эквивалентны матрицам (2.2) полезных сигналов необходимо вычитание от оценок $R_{gg}(0)$ величин $2R_{X\varepsilon}(0)$ и D_{ε} , а от значения оценок $R_{gg}(\mu)$ величины $2R_{X\varepsilon}(\mu)$, т.е.

$$\begin{aligned} R_{gg}^e(0) &= R_{gg}(0) - 2R_{X\varepsilon}(0) - D_{\varepsilon} = R_{XX}(0) \\ R_{gg}^e(\mu\Delta\tau) &= R_{gg}(\mu\Delta\tau) - 2R_{X\varepsilon}(\mu\Delta\tau) = R_{XX}(\mu\Delta\tau) \end{aligned}$$

$$\bar{R}_{gg}^e = \begin{bmatrix} R_{gg}^e(0) & R_{gg}^e(\Delta\tau) & \dots & R_{gg}^e[(m-1)\Delta\tau] \\ R_{gg}^e(\Delta\tau) & R_{gg}^e(0) & \dots & R_{gg}^e[(m-2)\Delta\tau] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{gg}^e[(m-1)\Delta\tau] & R_{gg}^e[(m-2)\Delta\tau] & \dots & R_{gg}^e(0) \end{bmatrix} = \bar{R}_{XX}.$$

Таким образом, очевидно, что для формирования из (2.11) матрицы, эквивалентной матрице (2.8) нормированной корреляционной функции полезного сигнала $X(t)$, после коррекции возникает необходимость в делении полученных оценок $R_{gg}^e(0), R_{gg}^e(\Delta t), \dots, R_{gg}^e((m-1)\Delta\tau)$ на D_X .

Однако в традиционных технологиях обычно эти оценки делят на дисперсию суммарного сигнала D_g . Это допустимо в тех случаях, когда выполняется равенство $D_g - D_X = 0$. В то же время для реальных зашумленных сигналов эта разность, т.е. $D_g - D_X = D_{\varepsilon}$, представляет собой значительную величину. Иногда имеет место равенство $D_{\varepsilon} \approx (0,1 \div 0,25)D_g$. Поэтому в этих случаях нормирование традиционными технологиями вносит дополнительную погрешность. Из-за этого для обеспечения эквивалентности матриц необходимо делить числитель элементов матрицы (3.4) на разность $D_g - D_{\varepsilon} = D_X$. Благодаря этому матрицу

$$\vec{r}_{gg}^e = \bar{R}_{gg}^e - 2\bar{R}_{X\varepsilon} = \vec{r}_{XX}$$

можно считать эквивалентной матрице (1.8).

Ниже предлагается один из возможных вариантов определения оценок $D_{\varepsilon}, R_{X\varepsilon}(\mu)$, $\mu = \overline{0, N}$ и т.д. зашумленного сигнала $g(t)$ при помощи алгоритмов, которые разработаны также на основе выражения (3.10).

Для этой цели рассмотрим результаты разложения правой части выражения (3.10) для случая, когда имеет место корреляция между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ при $\mu = 0$:

$$\begin{aligned}
 R'_{X\varepsilon}(\mu=0) &= M[g(t)g(t)] - 2M[g(t)g(t+\Delta t)] + M[g(t)g(t+2\Delta t)] = \\
 &= M[X(t)X(t)] - 2M[X(t)\varepsilon(t+\Delta t)] + M[\varepsilon(t)X(t+2\Delta t)] = \\
 &= R_{XX}(0) + R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) - 2R_{XX}(\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(\Delta t) - \\
 &- 2R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t). \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

При этом если выполняются условия стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов, то для рассматриваемых объектов, можно считать справедливыми равенства

$$\left. \begin{aligned}
 R_{X\varepsilon}(0) &= M[X(t)\varepsilon(t)] \neq 0 & R_{\varepsilon X}(0) &= M[\varepsilon(t)X(t)] \neq 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(0) &= M[\varepsilon(t)\varepsilon(t)] \neq 0 \\
 R_{XX}(0) + R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{XX}(\Delta t) &= 0 \\
 R_{X\varepsilon}(\Delta t) = R_{\varepsilon X}(\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) = R_{X\varepsilon}(2\Delta t) = R_{\varepsilon X}(2\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &= 0
 \end{aligned} \right\}. \quad (4.2)$$

Следовательно, в этом случае в правой части формулы (3.10) получим

$$R'_{X\varepsilon}(\mu=0) = R_{X\varepsilon}(0) + R_{\varepsilon X}(0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = 2R_{X\varepsilon}(0) + D_{\varepsilon}. \quad (4.3)$$

Это показывает, что полученную по формулам (3.10), (4.1) оценку $R_{X\varepsilon}(0)$ можно применять для корректировки элементов матриц (2.4), (2.11) даже при наличии корреляции между $X(t)$, $\varepsilon(t)$.

Теперь рассмотрим возможность вычисления оценки $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ при наличии корреляции между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ при $\mu = \Delta t$ по выражению

$$\begin{aligned}
 R'_{X\varepsilon}(\mu = \Delta t) &\approx M[g(t)g(t+\Delta t)] - 2M[g(t)g(t+2\Delta t)] + M[g(t)g(t+3\Delta t)] = \\
 &= M[[X(t) + \varepsilon(t)][X(t+\Delta t) + \varepsilon(t+\Delta t)]] - 2M[[X(t+\Delta t) + \varepsilon(t+\Delta t)][X(t+2\Delta t) + \varepsilon(t+2\Delta t)]] + \\
 &+ M[[X(t+\Delta t) + \varepsilon(t+\Delta t)][X(t+3\Delta t) + \varepsilon(t+3\Delta t)]] = R_{XX}(\Delta t) + R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) - \\
 &- 2R_{XX}(2\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}(2\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) + R_{X\varepsilon}(3\Delta t) + \\
 &+ R_{\varepsilon X}(3\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t). \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

Как было показано выше, при выполнении условий стационарности и нормальности закона распределения зашумленных сигналов для случая, когда между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ при $\mu = \Delta t$ имеет место корреляция, считая справедливыми равенства

$$\left. \begin{aligned}
 R_{X\varepsilon}(\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{\varepsilon X}(\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{XX}(\Delta t) + R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{XX}(2\Delta t) &= 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) &= 0 \\
 R_{X\varepsilon}(2\Delta t) = R_{\varepsilon X}(2\Delta t) = R_{X\varepsilon}(3\Delta t) = R_{\varepsilon X}(3\Delta t) &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

получим

$$R'_{X\varepsilon}(\Delta t) = R_{X\varepsilon}(\Delta t) + R_{\varepsilon X} = 2R_{X\varepsilon}(\Delta t). \quad (4.6)$$

Следовательно, оценку $R_{X\varepsilon}(\Delta t)$ можно определить по выражению

$$R_{X\varepsilon}(\Delta t) = \frac{1}{2} R'_{X\varepsilon}(\Delta t) = \frac{1}{2} M[g(t)g(t+\Delta t) - 2g(t)g(t+2\Delta t) + g(t)g(t+3\Delta t)]. \quad (4.7)$$

Можно показать, что при наличии корреляции между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ при $\mu = 2\Delta t$ аналогичным образом при помощи выражения:

$$\begin{aligned}
 R'_{X\varepsilon}(2\Delta t) &= M[g(t)g(t+2\Delta t)] - 2M[g(t)g(t+3\Delta t)] + M[g(t)g(t+4\Delta t)] = \\
 &= M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+2\Delta t)+\varepsilon(t+2\Delta t))] - 2M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+3\Delta t)+\varepsilon(t+3\Delta t))] + \\
 &+ M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+4\Delta t)+\varepsilon(t+4\Delta t))] = \\
 &= R_{XX}(2\Delta t) + R_{X\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon X}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) - 2R_{XX}(3\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}(3\Delta t) - \\
 &\quad - 2R_{\varepsilon X}(3\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) + R_{XX}(4\Delta t) + R_{X\varepsilon}(4\Delta t) + R_{\varepsilon X}(4\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(4\Delta t) \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

можно определить оценку $R_{X\varepsilon}(2\Delta t)$.

При этом аналогично вышеописанному можно считать справедливыми равенства

$$\left. \begin{aligned}
 R_{XX}(2\Delta t) + R_{XX}(4\Delta t) - 2R_{XX}(3\Delta t) &= 0 \\
 R_{X\varepsilon}(2\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{\varepsilon X}(2\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}(4\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{X\varepsilon}(3\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{\varepsilon X}(3\Delta t) &\neq 0 \\
 R_{\varepsilon\varepsilon}(2\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(3\Delta t) = R_{X\varepsilon}(4\Delta t) = R_{\varepsilon X}(4\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(4\Delta t) &= 0
 \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Следовательно, будем иметь

$$R'_{X\varepsilon}(2\Delta t) = 2R_{X\varepsilon}(2\Delta t),$$

т.е.

$$R_{X\varepsilon}(2\Delta t) = \frac{1}{2}R'_{X\varepsilon}(2\Delta t) = \frac{1}{2}M[g(t)g(t+2\Delta t) - 2g(t)g(t+3\Delta t) + g(t)g(t+4\Delta t)]. \quad (4.10)$$

Очевидно, что принимая во внимание выражения (4.2)-(4.10) при наличии корреляции между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ при l различных временных сдвигах, т.е. при $\mu = l\Delta t$ можно считать справедливой формулу

$$\begin{aligned}
 R'_{X\varepsilon}(l\Delta t) &= M[g(t)g(t+l\Delta t)] - 2M[g(t)g(t+(l+1)\Delta t)] + M[g(t)g(t+(l+2)\Delta t)] = \\
 &= M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+l\Delta t)+\varepsilon(t+l\Delta t))] - \\
 &\quad - 2M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+(l+1)\Delta t)+\varepsilon(t+(l+1)\Delta t))] + \\
 &\quad + M[(X(t)+\varepsilon(t))(X(t+(l+2)\Delta t)+\varepsilon(t+(l+2)\Delta t))] = \\
 &= R_{XX}(l\Delta t) + R_{X\varepsilon}(l\Delta t) + R_{\varepsilon X}(l\Delta t) + \\
 &\quad + R_{\varepsilon\varepsilon}(l\Delta t) - 2R_{XX}((l+1)\Delta t) - 2R_{X\varepsilon}((l+1)\Delta t) - 2R_{\varepsilon X}((l+1)\Delta t) \\
 &\quad - 2R_{\varepsilon\varepsilon}((l+1)\Delta t) + R_{XX}((l+2)\Delta t) + R_{X\varepsilon}((l+2)\Delta t) + \\
 &\quad + R_{\varepsilon X}((l+2)\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}((l+2)\Delta t).
 \end{aligned}$$

Аналогичным образом для случая, когда между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ существует корреляция при $\mu = l\Delta t$, где $l = \overline{1, L}$ можно считать справедливым равенства

$$\left. \begin{aligned} R_{X\varepsilon}(l\Delta t) &\neq 0 \\ R_{\varepsilon X}(l\Delta t) &\neq 0 \\ R_{XX}(l\Delta t) + R_{XX}((l+2)\Delta t) - 2R_{XX}((l+1)\Delta t) &= 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(l\Delta t) + R_{\varepsilon\varepsilon}((l+2)\Delta t) - 2R_{\varepsilon\varepsilon}((l+1)\Delta t) &= 0 \\ R_{X\varepsilon}((l+2)\Delta t) &\neq 0 \\ R_{\varepsilon X}((l+2)\Delta t) &\neq 0 \\ R_{\varepsilon\varepsilon}(l\Delta t) = R_{X\varepsilon}((l+1)\Delta t) = R_{\varepsilon X}((l+1)\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}((l+1)\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}((l+2)\Delta t) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (4.11)$$

где $l = \overline{1, L}$.

Следовательно, принимая во внимание, что

$$R'_{X\varepsilon}(l\Delta t) = 2R_{X\varepsilon}(l\Delta t)$$

оценку $R_{X\varepsilon}(l\Delta t)$ можно определить по обобщенному выражению

$$R_{X\varepsilon}(l\Delta t) = \frac{1}{2} R'_{X\varepsilon}(l\Delta t) = \frac{1}{2} M[g(t)g(t+l\Delta t) - 2g(t)g(t+(l+1)\Delta t) + g(t)g(t+(l+2)\Delta t)],$$

где $l = \overline{1, L}$.

Проведенные экспериментальные анализы зашумленных сигналов, полученных на сейсмоакустических станциях [11], на компрессорных станциях [15], на стационарных морских платформах [19], на объектах нефтегазодобычи и нефтепереработки [18] и на биологических сигналах [11] показали, что на практике нередко между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ имеет место корреляция при различных временных сдвигах. Причем, в указанных экспериментах максимальный временной сдвиг не превышал $\mu = 6$, т.е. при $\mu = 6$ корреляция исчезала. При этом выполнялись условия стационарности, нормальности закона распределения, и полученные оценки позволяли использовать их для коррекции результатов, полученных по традиционным технологиям.

5. Применения предложенной технологии для создания системы мониторинга начала скрытого периода аварий на стационарных морских платформах. На основе предложенной технологии для обеспечения безопасной эксплуатации морских стационарных платформ (СП) ниже на рис. 1 предлагается система мониторинга начала скрытого периода их перехода в аварийного состояние. В процессе выполнения этой работы была проверена эффективность разработанной технологии путем проведения основательных экспериментов в течении длительного периода времени во время эксплуатации СП в реальных морских условиях.

На рис. 1 приведена структурная схема системы помехомониторинга начала скрытого периода перехода СП в аварийное состояние. В системе информация о техническом состоянии платформы отражается на зашумлённых сигналах, получаемых на выходах акустических датчиков Accutech AM20 и вибрационных датчиков Bean Device AX-3D, которые устанавливаются во всех отсеках платформы. Сбор измерительной информации осуществляется по радиоканалу Wi-Fi с помощью контроллера Bean CetanWay Contoller. Анализ акустических и вибрационных сигналов, формирование информативных признаков и создание базы знаний (БЗ) осуществляется на промышленном компьютере Getac A770. Для повышения достоверности результатов мониторинга технология вычисления оценок нормированных корреляционных функций сочетается с определением характеристик помехи акустических и вибрационных сигналов. При их реализации, после многочисленных экспериментов, было установлено, что акустические и вибрационные сигналы целесообразно

дискретизировать с частотой $f = 1000 - 2000$ Гц. При этом, при количестве отсчетов $g(i\Delta t)$ $n \geq 4048 - 8096$ удавалось получить устойчивые оценки как нормированных корреляционных функций, так и характеристик помехи.

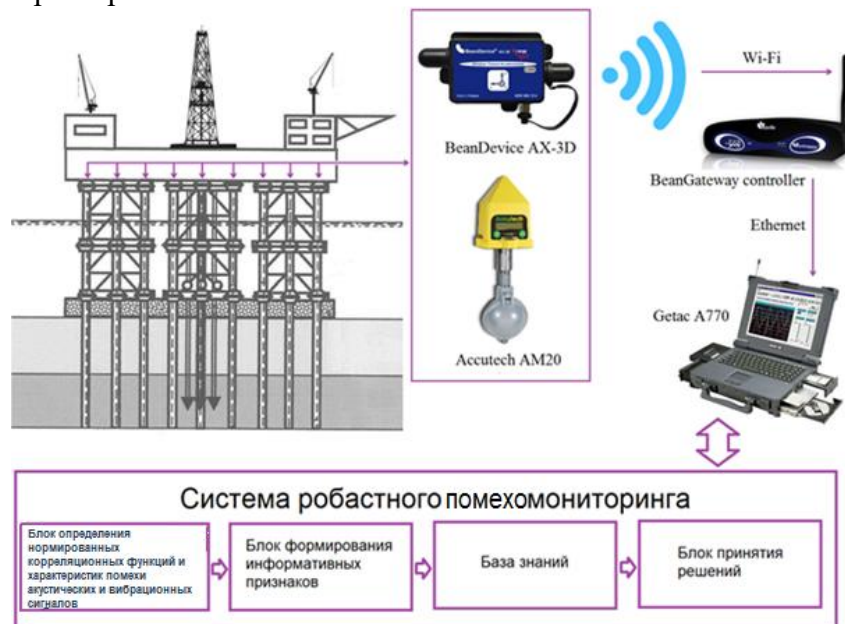


Рис. 1. Структурная схема системы помехомониторинга начала скрытого периода перехода СП в аварийное состояние

Во время экспериментов [19] было также установлено, что авариям на СП всегда предшествует зарождение некоторых дефектов. Например, было выявлено, что одной из наиболее распространенных причин аварий на СП являются трещины, которые появляются в результате циклических нагрузок. Как правило, процесс развития трещины начинается с образования микротрещин, «огрубления» поверхности, растрескивания по границам зерен, а также вокруг твердых включений и сопровождается дальнейшим проникновением вглубь материала. В некоторых случаях микротрещина превращается в макротрещину и достаточно быстро распространяется в металле. Степень роста трещины часто является следствием усталости металла и определяется условиями эксплуатации. Эксперименты также показали, что при появлении микротрещины в металлических фермах и опорах СП сначала слышен слабый писк, затем писк становится сильнее, потом напоминает плач младенца, а затем слышен металлический скрип и т.д. При этом спектры как помехи, так и полезного акустического сигнала постоянно меняются. Одновременно с этим также меняются оценки нормированных корреляционных функций и помех, что позволяет использовать их в качестве носителей информации о зарождении дефекта.

В случае появления микроотверстия в нефтегазопроводе, подключенном к компрессорным станциям платформы, обычно сначала слышен слабый свист, потом свист становится сильнее, потом труба гудит, наконец, храпит и булькает. То же самое происходит и с помехой сигнала, получаемой на выходе вибрационного датчика. Сначала появляется слабый высокочастотный шум, затем постепенно спектр шума уменьшается, амплитуда увеличивается. Следовательно, все это время характеристики помехи сигналов, получаемых на выходе акустических и вибрационных датчиков, также непрерывно меняются. Очевидно, что при этом оценки характеристик помехи также можно принимать как информативный признак начала скрытого периода появления микроотверстия, которое впоследствии может стать причиной аварий.

При зарождении другого дефекта, такого как ослабление места закрепления швеллера к ферме платформы, на вибрационных и акустических сигналах соответствующих датчиков также появляется высокочастотный шум. По мере развития этого дефекта частота спектра шума постепенно уменьшается, и этот процесс продолжается до момента перехода платформы в аварийное состояние. В этом случае оценки нормированных корреляционных функций и характеристик помехи также становятся информативными признаками начала скрытого периода возникновения аварийного состояния.

Таким образом, экспериментально было установлено, что зарождение любого из вышеуказанных дефектов отражается на оценках как нормированных корреляционных функций, так и характеристик помехи акустических и вибрационных сигналов, полученных от датчиков соответствующих отсеков конструкции СП. Анализ зашумленных сигналов $g(t)$, полученных от вибрационных и акустических датчиков на СП также показал, что при зарождении различных дефектов между $X(t)$ и $\varepsilon(t)$ возникает корреляция. Причем, во время указанных экспериментов было выявлено, что в зависимости от степени развития дефекта увеличиваются эти временные сдвиги. При этом максимальный временной сдвиг не превышал $\mu = 6$, т.е. при $\mu = 6$, корреляция исчезала.

В процессе функционирования системы, указанной на рис.1, формируется комбинация указанных информативных признаков. Естественно, что это осуществляется при эксплуатации СП как при нормальных погодных условиях, так и при экстремальных. В начале возникновения микроизменений в техническом состоянии СП в блоке формирования информативных признаков также формируются соответствующие эталонные комбинации как из оценок нормированных корреляционных функций, так и из оценок характеристик помехи. Это происходит также при зарождении других всевозможных неисправностей. При этом меняются искомые оценки и формируются соответствующие эталонные комбинации оценок вибрационных и акустических сигналов. Причем каждой из возможных неисправностей практически соответствует множество определенных комбинаций этих оценок. Благодаря этому, через определенный период времени эксплуатации, в результате появления различных дефектов, в БЗ системы формируется и запоминается множество эталонных комбинаций как нормального состояния, так и соответствующих неисправностей объекта.

Таким образом, система на рис.1 в режиме мониторинга начала скрытого периода перехода объекта в аварийное состояние на первом этапе работает в режиме обучения. При этом в первую очередь, из нормированных оценок и из оценок характеристик помехи акустических и вибрационных сигналов составляются эталонные комбинации информативных признаков (КИП) в следующем виде

$$D_{\varepsilon_i}, \dots, R_{X_i \varepsilon_i}(0), R_{X_i \varepsilon_i}(\Delta t), R_{X_i \varepsilon_i}(2\Delta t), \dots, r_{g_i g_i}(0), r_{g_i g_i}(\Delta t), r_{g_i g_i}(2\Delta t), \dots \text{ где } i = \overline{1, n}$$

$$k_{X \varepsilon_{i_0}} = R_{X_i \varepsilon_i}(0) / D_{\varepsilon_i}, k_{X \varepsilon_{i_2}} = R_{X_i \varepsilon_i}(\Delta t) / D_{\varepsilon_i}, k_{X \varepsilon_{i_2}} = R_{X_i \varepsilon_i}(2\Delta t) / D_{\varepsilon_i}, \dots, \text{ где } i = \overline{1, n},$$

$$k_{r_{i_0}} = \frac{|r_{g_i g_i}(0) - r_{g_i g_i}(\Delta t)|}{\Delta t}, k_{r_{i_1}} = \frac{|r_{g_i g_i}(\Delta t) - r_{g_i g_i}(2\Delta t)|}{\Delta t},$$

$$k_{r_{i_2}} = \frac{|r_{g_i g_i}(2\Delta t) - r_{g_i g_i}(3\Delta t)|}{\Delta t}, \dots, k_{r_{i_{n-1}}} = \frac{|r_{g_i g_i}((n-1)\Delta t) - r_{g_i g_i}(n\Delta t)|}{\Delta t}.$$

Далее из этих комбинаций эталонных информативных признаков формируются множества информативных признаков, соответствующие нормальному техническому состоянию объекта в следующем виде

$$W_1 = \begin{cases} D_{\varepsilon_i}, \dots, R_{X_1\varepsilon_1}(\mu), r_{g_1g_1}(\mu), \mu = \overline{0, n} \\ k_{X\varepsilon_{i0}} = R_{X_1\varepsilon_1}(0)/D_{\varepsilon_i}, k_{X\varepsilon_{i1}} = R_{X_1\varepsilon_1}(\Delta t)/D_{\varepsilon_i}, k_{X\varepsilon_{i2}} = R_{X_1\varepsilon_1}(2\Delta t)/D_{\varepsilon_i}, k_{r_{i0}}, k_{r_{i1}}, k_{r_{i2}}, \dots, k_{r_{i_{n-1}}}, \\ D_{\varepsilon_z}, \dots, R_{X_2\varepsilon_2}(\mu), r_{g_2g_2}(\mu), \mu = \overline{0, n} \\ k_{X\varepsilon_{z0}} = R_{X_2\varepsilon_2}(0)/D_{\varepsilon_z}, k_{X\varepsilon_{z1}} = R_{X_2\varepsilon_2}(\Delta t)/D_{\varepsilon_z}, k_{X\varepsilon_{z2}} = R_{X_2\varepsilon_2}(2\Delta t)/D_{\varepsilon_z}, k_{r_{z0}}, k_{r_{z1}}, k_{r_{z2}}, \dots, k_{r_{z_{n-1}}} \\ \dots \\ D_{\varepsilon_m}, \dots, R_{X_m\varepsilon_m}(\mu), r_{g_mg_m}(\mu), \mu = \overline{0, n} \\ k_{X\varepsilon_{m0}} = R_{X_m\varepsilon_m}(0)/D_{\varepsilon_m}, k_{X_m\varepsilon_m} = R_{X_m\varepsilon_m}(\Delta t)/D_{\varepsilon_m}, k_{X_m\varepsilon_m} = R_{X_m\varepsilon_m}(2\Delta t)/D_{\varepsilon_m}, k_{r_{m0}}, k_{r_{m1}}, k_{r_{m2}}, \dots, k_{r_{m_{n-1}}} \end{cases}$$

Продолжительность процесса обучения зависит от специфических особенностей погодных условий. В дальнейшем, после завершения обучения, при экстремальных погодных условиях если какая-либо комбинация оценок совпадает с уже имеющейся в БЗ, то в блоке принятия решений отмечается факт совпадения. Если же текущая комбинация отличается от всех уже имеющихся в БЗ, то в соответствующее множество заносится новый эталон. Со временем наступает момент, когда вновь полученные текущие оценки неоднократно оказываются равными или близкими по значению к уже имеющимся в БЗ комбинациям из соответствующего множества. Только при неоднократном повторении таких результатов первый этап процесса обучения считается завершенным. Таким образом, на первом этапе формируется БЗ, при помощи которой можно осуществить мониторинг начала аварий.

На втором этапе начинается мониторинг технического состояния платформы. При этом вычисление информативных признаков и составление из них КИП осуществляется аналогично вышеописанному. Однако в этом случае, если текущая комбинация оценок совпадает с уже имеющимися в БЗ оценками из множества, соответствующего нормальному, то это принимается как подтверждение нормального технического состояния. Если же в какой-то период времени текущая комбинация будет отличаться от всех множеств нормального состояния и будет совпадать с уже имеющейся в БЗ комбинацией неисправности, тогда формируется информация о возможных микроизменениях в техническом состоянии соответствующей части СП. Эта информация одновременно через радиомодем передается на монитор обслуживающему персоналу.

При этом им предоставляется перечень всех соответствующих данному состоянию комбинаций оценок из БЗ, а также значение оценок текущей комбинации. После проведения обслуживающим персоналом соответствующих мер, направленных на диагностику и контроль технического состояния объекта, в случае, если никаких нарушений не обнаруживается и устанавливается, что объект функционирует в нормальном режиме, текущая КИП также вносится в соответствующее множество эталонных комбинаций и запоминается в БЗ. В противном случае, фиксируется начало перехода платформы в аварийное состояние, формируется информация и это регистрируется в виде протокола с указанием результатов мониторинга и времени. На экране системы мониторинга, когда объект находится в нормальном состоянии, эта информация отражается зеленым цветом; при обнаружении начальной стадии неисправности – желтым цветом; при аварийном состоянии – красным цветом.

6. Заключение.

1. Анализ трудностей, возникающих при формировании корреляционных матриц для входных-выходных сигналов реальных производственных объектов, показал, что при применении традиционных методов из-за значительных погрешностей оценок их элементов,

от влияния помехи измерительной информации обеспечение адекватности результатов решение многих прикладных задач в большинстве случаев не удается.

2. Имеется множество методов фильтрации помехи, которые применяются для устранения всевозможных погрешностей зашумленных сигналов. Однако в реальных объектах помехи измерительной информации, появляются от возникновения различных неисправностей в процессе эксплуатации и отражаются на сигналах в виде шума. Причем между ними имеется корреляция и из-за этого диапазон их спектра нередко пересекается со спектром полезного сигнала. Кроме того, их спектры не являются строго стабильными. По этим причинам в процессе фильтрации не всегда достигается желаемый результат. Иногда даже в результате фильтрации происходит искажение спектра полезного сигнала.

3. Во многих реальных промышленных объектах, как правило, входные и выходные переменные являются такими физическими величинами как расход, давление, температура, скорость и т.д. Поэтому при решении множества прикладных задач при формировании корреляционных матриц, возникает необходимость применения процедуры нормирования ее элементов. В работе показано, что при применении традиционных методов возникает дополнительная погрешность, приводящая к нарушению адекватности полученных результатов. Для ее устранения предложены алгоритмы, которые при наличии оценки дисперсии помехи легко реализовывается на практике.

4. Предложенные алгоритмы и технологии, позволяют формировать корреляционные матрицы зашумленных случайных процессов, эквивалентные матрицам их полезных сигналов, как для случая, когда между полезным сигналом и помехой корреляция отсутствует, так и случая, когда корреляция имеет место. Благодаря этому устраняются трудности решения многочисленных прикладных задач с применением корреляционных матриц. Например, открываются возможности решения задачи идентификации технического состояния многочисленных производственных объектов контроля. А это, в свою очередь, позволяет своевременно прогнозировать возможные аварийные ситуации и принимать меры по их устранению.

5. Предложенные алгоритмы коррекции оценок корреляционных функций и технологии формирования корреляционных матриц не являются универсальными, их применение эффективно для случая, когда для анализируемых случайных зашумленных сигналов условия (4.2), (4.5), (4.9), (4.11) выполняются. Их достоинства связаны с тем, что, как показали проведенные экспериментальные исследования, в реальной жизни во многих областях, где необходимо решение соответствующих прикладных задач эти условия выполняются. К тому же контроль выполнения этих условий на современных средствах информатики достаточно просто реализовывается.

Кроме того, в процессе эксплуатации многих объектов возникает необходимость осуществить мониторинг скрытого периода их перехода в аварийное состояние в реальном масштабе времени. В этих случаях идентификация технического состояния объекта требует много времени. Поэтому для этих случаев оказалось целесообразным осуществить мониторинг начала перехода объектов из нормального в аварийное состояние при помощи множества noise характеристик зашумленных сигналов $g_1(t), g_2(t), g_3(t), \dots, g_m(t)$, таких как

$$D_{\varepsilon_i}, \dots, R_{X_i \varepsilon_i}(0), R_{X_i \varepsilon_i}(\Delta t), R_{X_i \varepsilon_i}(2\Delta t), \dots, r_{g_i g_i}(0), r_{g_i g_i}(\Delta t), r_{g_i g_i}(2\Delta t), \dots$$

Проведенные исследования показали, что отношение взаимно корреляционной функции $R_{X_i \varepsilon_i}(\mu)$ к величине D_{ε_i} также служит информативным признаком для мониторинга скрытого периода зарождения аварий

$$k_{X_i \varepsilon_{i0}} = R_{X_i \varepsilon_i}(0) / D_{\varepsilon_i}, k_{X_i \varepsilon_{i1}} = R_{X_i \varepsilon_i}(\Delta t) / D_{\varepsilon_i}, k_{X_i \varepsilon_{i2}} = R_{X_i \varepsilon_i}(2\Delta t) / D_{\varepsilon_i}, \dots$$

Таким образом, в процессе эксплуатации объекта контроля появление различных

дефектов в виде износа, микротрещин, нагарообразования, деформации от усталости приводит к изменению их технического состояния и это отражается в виде помехи $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \varepsilon_3(t), \dots, \varepsilon_m(t)$ на сигналах $g_1(t), g_2(t), g_3(t), \dots, g_m(t)$. А это в свою очередь приводит к изменению их вышеуказанных характеристик. Это открывает возможность мониторинга начала перехода объекта в аварийное состояние при помощи множества указанных информативных признаков.

Например, как показали экспериментальные исследования, при мониторинге начала аварий на компрессорных станциях, на установках добычи нефти и бурения нефтяных скважин, на морских стационарных платформах и т.д. отклонение текущих комбинаций информативных признаков от оценок элементов эталонных множеств можно воспринимать как начало перехода этих объектов из нормального в аварийное состояние.

Литература

1. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. Москва. Изд-во МГТУ, 1993.
2. Солодовников В.В., Матвеев П.С., Вальденберг Ю.С., Бабурин В.М. Вычислительная техника в применении для статистических исследований и расчетов систем автоматического управления. Москва. Гос. научно-техническое изд-во машиностроит. лит-ры, 1963.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
4. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. Москва. Наука, ГРФМЛ, 1991.
5. Дивеев А.И., Пупков К.А., Софронова Е.А. Общая задача синтеза оптимального управления и ее решение в классе интеллектуальных систем / Труды Десятого Международного Симпозиума Интеллектуальные Системы Intels'2012. Москва. 2012, с.10-18.
6. Карпенко А.П. Новые многоагентные алгоритмы глобальной оптимизации / Труды Десятого Международного Симпозиума Интеллектуальные Системы Intels'2012. Москва. 2012, с.38-42.
7. Пупков К.А. Интеллектуальные системы в мехатронике / Труды Восьмого Международного Симпозиума Интеллектуальные Системы Intels'2008. Москва. 2008, с.17-24.
8. Пупков К.А., Воронов Е.М., Коньков В.Г., Карпунин А.А. Структурная сложность интеллектуальных систем управления / Труды Восьмого Международного Симпозиума Интеллектуальные Системы Intels'2008. Москва. 2008, с.29-34.
9. Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю. Идентификация и диагностика систем. Москва. Изд. Центр «Академия», 2009.
10. Aliev T.A. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. New-York. Kluwer Acad./Plen. Publishers. 2003.
11. Aliev T.A. Digital Noise Monitoring of Defect Origin. London. Springer. 2007.
12. Алиев Т.А., Мусаева Н.Ф. Статистическая идентификация с уравниванием погрешностей // Теория и системы управления. 1995, №3, с.50-55.
13. Алиев Т.А., Мусаева Н.Ф. Алгоритм определения дисперсии помехи случайных сигналов // Приборы и системы управления. 1997, №12, с.33-34.
14. 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, Vol.59, №5, pp.679-688.
15. Aliev T.A., Guluyev G.A., Pashayev F.H., Sadygov A.B. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // Mechanical Systems and Signal Processing. 2012, Vol.27, pp.755-762.
16. Aliev T.A., Abbasov A.M., Guluyev Q.A., Pashaev F.H., Sattarova U.E. System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013, Vol.32, Is.1, pp.11-25.
17. Mehdiyeva G.Y., Ibrahimov V.R., Imanova M.N. Some refinement of the notion of symmetry for the Volterra integral equations and the construction of symmetrical methods to solve them // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2016, Vol 306, pp.1-9.
18. Алиев Т.А., Мамедов Ш.И. Интеллектуальная система робастного прогнозирования аварий при бурении скважин // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2002, №1, с.9-12.
19. Алиев Т.А., Т.А. Ализаде, Х.С. Таирова. Гибридная система контроля и диагностики состояния морских платформ // Нефтяное хозяйство. 2000, №1, с.29-31.

UOT 519.216

T.A. Əliyev, N.F. Musayeva, N.E. Rzayeva, Ü.E. Səttarova

İdarəetmə obyektlərinin texniki vəziyyətlərinə ekvivalent korrelyasiya matrislərinin formalaşdırma alqoritmləri

İstehsalat obyektlərinin küylü giriş-çıxış siqnallarının korrelyasiya matrislərinin formalaşdırmasının çətinlikləri analiz olunub. Küyün xarakteristikalarının qiymətlərinin hesablama alqoritmləri və küylü təsadüfi proseslərin faydalı siqnallarının korrelyasiya matrislərinə ekvivalent olan matrislərinin formalaşdırma texnologiyaları təklif olunub. Eyni zamanda fasiləsiz stoxastik xətti obyektlərin xüsusiyyətləri nəzərə alınıb. Təklif olunan texnologiyanın stasionar dəniz platformalarında qəzaların gizli dövrünün başlanğıcının monitoring sisteminin yaradılması üçün istifadəsinin mümkünlüyü göstərilib.

Açar sözlər: idarəetmə obyektı, texniki vəziyyət, dəniz platforması, korrelyasiya matrisi, korrelyasiya funksiyası, küy, küylü siqnal, monitoring

T.A. Aliev, N.F. Musaeva, N.E. Rzaeva, U.E. Sattarova

Algorithms for forming correlation matrices equivalent to the technical condition of control objects

We analyze the challenges of forming the correlation matrices of noise input and output signals of industrial objects. We propose algorithms for calculating the estimates of noise characteristics and technologies for forming the correlation matrices equivalent to the matrices of useful signals of noisy random processes. The specific characteristics of continuous stochastic linear objects are taken into account and it is also demonstrated that said technology can be used in the development of a system for monitoring the beginning of the latent period of accidents on fixed offshore platforms.

Keywords: control objects, technical condition, offshore platform, correlation matrix, correlation function, noise, noisy signals, monitoring

Институт Систем Управления НАН Азербайджана

Представлено 30.06.2017