

УДК 519.216

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

### NOISE ТЕХНОЛОГИЯ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ НОРМИРОВАНИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

Показано, что при решении задач мониторинга, контроля, диагностики, идентификации, управления и т.д. с применением традиционной технологии нормирования оценок авто и взаимно корреляционных функций реальных технологических параметров появляются дополнительные погрешности, которые оказывают существенное влияние на точность полученных результатов. Анализируются источники возникновения этих погрешностей как для случая, когда между помехой и полезным сигналом имеет место корреляция, так и для случая, когда ее нет. Выведены аналитические выражения для нормирования оценок авто и взаимно корреляционных функций, позволяющие исключить погрешности от помехи, предложены алгоритмы вычисления оценок величины помехокорреляции, состоящей из суммы оценок дисперсии помехи и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой.

**Ключевые слова:** стохастический процесс, технологический параметр, зашумленный сигнал, корреляционная функция, нормированные оценки.

**1. Введение.** Известно, что в системах контроля и управления реальными объектами с многомерными случайными непрерывными входными-выходными параметрами для решения задач контроля, диагностики, идентификации, оптимизации, управления и т.д. применяются технологии корреляционного анализа [1,2] и фильтрации [3-9]. При этом, в первую очередь, обеспечивают вычисление оценок статистических характеристик технологических параметров и определяют корреляционные матрицы. В литературе [10-15] предлагаются многочисленные методы решения этих задач.

Обычно допускается, что технологический параметр  $g(t)$  является стационарным, эргодическим и состоит из смеси полезного сигнала  $X(t)$  и помехи  $\varepsilon(t)$ , т.е.

$$g(t) = X(t) + \varepsilon(t), \quad (1.1)$$

его математическое ожидание равно нулю, и он имеет нормальный закон распределения т.е.

$$m_X \approx \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \approx 0 \quad (1.2)$$

$$m_\varepsilon \approx \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t) dt \approx 0. \quad (1.3)$$

Также имеют место равенства:

$$R_{X\varepsilon}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T X(t)\varepsilon(t+\tau) dt \approx 0 \text{ при } \tau > 0 \quad (1.4)$$

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\tau) \approx \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon(t)\varepsilon(t+\tau) dt \approx 0 \text{ при } \tau > 0 \quad (1.5)$$

При этом технологические параметры реальных объектов, как правило, представляют собой различные физические величины. Поэтому требуется приведение их к единой безразмерной величине [16-19]. Это осуществляется с применением процедуры нормирования [1]. Проведенный анализ показывает, что в результате применения традиционных методов нормирования в значения оценок как автокорреляционных функций, так и взаимно корреляционных функций возникает дополнительная погрешность. Причина этого связана с тем, что помеха влияет на оценки нормированных корреляционных функций. Это приводит к неадекватности решения вышеуказанных задач.

В связи с этим необходимо создание технологии, ориентированной на устранение влияния помехи на оценки нормированных корреляционных функций как в случае, когда отсутствует корреляция между полезным сигналом и помехой, так и в случае, когда она имеется. Данная работа посвящена одному из возможных вариантов решения этой задачи.

Ниже, во втором разделе, ставится задача создания технологий устранения погрешностей, возникающих от влияния помехи при нормировании оценок авто и взаимно корреляционных функций.

В третьем разделе выведены аналитические выражения для нормирования оценок авто и взаимно корреляционных функций, позволяющие исключить погрешности от помехи, предложены алгоритмы вычисления оценок величины помехокоорреляции, состоящей из суммы оценок дисперсии помехи и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой, приведена методика выполнения процедуры нормирования оценок авто и взаимно корреляционных функций с применение предложенной технологии. Там же приведен результат вычислительного эксперимента.

**2. Постановка задачи.** Известно, что нормированные авто и взаимно корреляционные функции полезных сигналов  $X(t)$ ,  $Y(t)$  вычисляются по формулам (1.1), (1.2):

$$r_{xx}(\mu) = R_{xx}(\mu) / D(x), \quad (2.1)$$

$$r_{xy}(\mu) = R_{xy}(\mu) / \sqrt{D(x)D(y)}, \quad (2.2)$$

где оценки авто и взаимно корреляционных функций определяются по выражениям:

$$R_{xx}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) X((i+\mu)\Delta t), \quad (2.3)$$

$$R_{xy}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) Y((i+\mu)\Delta t); \quad (2.4)$$

$D(x) = R_{xx}(0)$ ,  $D(y) = R_{yy}(0)$  — оценки дисперсий сигналов  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ;  $\mu = 0$ ,  $\mu = \Delta t$ ,  $\mu = 2\Delta t$ ,  $\mu = 3\Delta t$ , ...

Оценки нормированных авто и взаимно корреляционных функций  $r_{gg}(\mu)$ ,  $r_{g\eta}(\mu)$  зашумленных сигналов, состоящих из суммы случайных полезных сигналов  $X(t)$ ,  $Y(t)$  и соответствующих помех  $\varepsilon(t)$ ,  $\varphi(t)$

$$g(t) = X(t) + \varepsilon(t), \quad \eta(t) = Y(t) + \varphi(t), \quad (2.5)$$

вычисляются по формулам:

$$r_{gg}(\mu) = R_{gg}(\mu) / D(g), \quad (2.6)$$

$$r_{g\eta}(\mu) = R_{g\eta}(\mu) / \sqrt{D(g)D(\eta)}, \quad (2.7)$$

где

$$R_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t) \right) \left( X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t) \right), \quad (2.8)$$

$$R_{g\eta}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) \eta((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t) \right) \left( Y((i+\mu)\Delta t) + \varphi((i+\mu)\Delta t) \right). \quad (2.9)$$

Принимая во внимание, что между оценками  $g(t)$  и  $X(t)$ , а также  $\eta(t)$  и  $Y(t)$  в равенствах (2.3), (2.4) и (2.8), (2.9) имеют место очевидные неравенства  $R_{xx}(\mu) \neq R_{gg}(\mu)$ ,  $R_{xy}(\mu) \neq R_{g\eta}(\mu)$  можно заметить, что оценки нормированных авто и взаимно корреляционных функций полезных

сигналов значительно отличаются от оценок нормированных авто и взаимно корреляционных функций зашумленных сигналов  $g(t), \eta(t)$  то есть

$$r_{gg}(\mu) \neq r_{XX}(\mu), \quad (2.10)$$

$$r_{g\eta}(\mu) \neq r_{XY}(\mu). \quad (2.11)$$

В данной работе ставится задача разработки технологий, позволяющих получить такие оценки нормированных авто и взаимно корреляционных функций  $r_{gg}^R(\mu), r_{g\eta}^R(\mu)$ , зашумленных сигналов  $g(t), \eta(t)$  которые обеспечили бы выполнение равенств

$$r_{gg}(\mu) \approx r_{XX}(\mu), \quad (2.12)$$

$$r_{g\eta}(\mu) \approx r_{XY}(\mu). \quad (2.13)$$

как для случая, когда имеется корреляция между полезными сигналами и помехами, так и в случае, когда корреляция равна нулю.

**3. Методы решения.** Технологии коррекции погрешностей при процедуре нормирования корреляционных функций.

Для решения указанной задачи сначала рассмотрим трудности, с которыми сталкиваются при вычислении оценок нормированных корреляционных функций.

Если принять во внимание, что оценка дисперсии  $D(\varepsilon)$  помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$ , [20,21] определяется по формуле

$$D_\varepsilon = D(\varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) \quad (3.1)$$

когда значения  $\varepsilon(i\Delta t)$  и  $\varepsilon((i+\mu)\Delta t)$  при  $\mu \neq 0$  не коррелируют между собой, то есть

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon((i+\mu)\Delta t) \approx 0 \text{ при } \mu \neq 0, \quad (3.2)$$

тогда при наличии корреляции между полезным сигналом  $X(t)$  и помехой  $\varepsilon(t)$ , т.е.  $R_{X\varepsilon}(\mu=0) \neq 0$ ,

$R_{Y\varepsilon}(\mu=0) \neq 0$ , равенство (2.3) можно соответственно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu=0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) + 2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) = R_{XX}(\mu=0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu=0) + D(\varepsilon) \end{aligned} \quad (3.3)$$

где взаимно корреляционная функция  $R_{X\varepsilon}(\mu=0)$  между полезным сигналом и помехой равна:

$$R_{X\varepsilon}(\mu=0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t). \quad (3.4)$$

В то же время уравнение (2.8) при  $\mu \neq 0$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 R_{gg}(\mu \neq 0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t)] = \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \\
 &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t)
 \end{aligned}$$

Принимая во внимание, что

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\
 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\
 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0
 \end{aligned} \right. \quad (3.5)$$

можно написать

$$R_{gg}(\mu \neq 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X(i+\mu)\Delta t = R_{XX}(\mu \neq 0), \quad (3.6)$$

следовательно при  $(\mu \neq 0)$  будет иметь место равенство:  $R_{gg}(\mu \neq 0) = R_{XX}(\mu \neq 0)$ . Из выражения (3.3) следует, что при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой оценка автокорреляционной функции содержит погрешность, равную на величину помехокорреляции  $D_{\varepsilon}$ , т.е.

$$D_{\varepsilon} = 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + D(\varepsilon). \quad (3.7)$$

Следовательно формулу (2.6) вычисления оценки нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала  $g(t)$  можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 r_{gg}(\mu = 0) &= \frac{R_{gg}(\mu = 0)}{D(g)} \\
 r_{gg}(\mu \neq 0) &= \frac{R_{gg}(\mu \neq 0)}{D_g - 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) - D(\varepsilon)}
 \end{aligned} \right\}. \quad (3.8)$$

Благодаря этому результаты нормирования корреляционных функций как полезного сигнала  $X(t)$ , так и зашумленного сигнала  $g(t)$  будут совпадать.

Аналогичным образом при наличии корреляции между полезным сигналом и помехой формуле (2.7) вычисления оценок нормированных взаимно корреляционных функций можно представить в виде:

$$r_{g\eta}(\mu) = \frac{R_{g\eta}(\mu)}{\sqrt{\left[ D(g) - 2R_{X\varepsilon}(0) - D(\varepsilon) \right] \cdot \left[ D(\eta) - 2R_{Y\varphi}(0) - D(\varphi) \right]}}, \quad (3.9)$$

где  $D(g) = R_{gg}(0)$ ,  $D(\eta) = R_{\eta\eta}(0)$ .

Таким образом дополнительная погрешность, которая возникает от процедуры нормирования авто и взаимно корреляционных функций по выражениям (2.6),(2.7) можно устранить применяя выражения (3.8), (3.9). Однако, для этого необходимо располагать оценками  $D(\varepsilon)$  и  $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ ,

$D(\varphi)$ , и  $R_{Y\varphi}(\mu = 0)$ .

Алгоритм вычисления оценок дисперсии помехи и взаимно корреляционной функции между полезным сигналом и помехой.

Из выражений (3.8), (3.9) очевидно, что для вычисления оценок  $r_{gg}(\mu)$ ,  $r_{g\eta}(\mu)$  требуется предварительное определение оценок  $R_{X\varepsilon}(0)$ ,  $R_{Y\varphi}(0)$ ,  $D_\varepsilon(\varepsilon)$ ,  $D(\varphi)$ . Отметим, что при решении многочисленных задач контроля, диагностики, идентификации также возникает необходимость определения этих оценок [1,2,12].

В связи с этим сначала рассмотрим возможность определения дисперсии помехи и полезного сигнала технологического параметра  $g(i\Delta t)$ . Известно, что формулу вычисления оценки автокорреляционной функции  $R_{gg}(\mu)$  централизованного дискретизированного случайного сигнала  $g(i\Delta t)$  с учетом влияния помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g((i+\mu)\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)][X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon((i+\mu)\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t)] = \\ &= R_{XX}(\mu) + \lambda_1(\mu), \end{aligned} \quad (3.10)$$

где

$$R_{XX}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t), \quad (3.11)$$

$$\lambda_1(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t)], \quad (3.12)$$

$\lambda_1(\mu)$  – погрешность корреляционной функции  $R_{gg}(\mu)$ .

Также известно, что когда отсчеты полезного сигнала  $X(i\Delta t)$  и помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$ , отсчеты помехи  $\varepsilon(i\Delta t)$  и  $\varepsilon((i+\mu)\Delta t)$  не коррелируют между собой, имеют место равенства:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) &\approx 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) &\approx 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) = D_\varepsilon = D(\varepsilon). \quad (3.14)$$

С учетом (3.13), (3.14) равенство (3.10) можно записать в виде:

$$R_{gg}(\mu = 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)X(i\Delta t) + X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)X(i\Delta t)] + D_\varepsilon \approx R_{XX}(\mu = 0) + D_\varepsilon, \quad (3.15)$$

$$R_{gg}(\mu \neq 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t) + X(i\Delta t)\varepsilon((i+\mu)\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)X((i+\mu)\Delta t)] \approx R_{XX}(\mu \neq 0) \quad (3.16)$$

Также известно [1,2,22,23], что если по выражению (3.11) определить оценки  $R_{XX}(\mu = 0)$ ,  $R_{XX}(\mu = \Delta t)$ ,  $R_{XX}(\mu = 2\Delta t)$ , их разности будут близкими величинами:

$$\lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} [R_{XX}(\mu = 0) - R_{XX}(\mu = \Delta t)] \approx \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} [R_{XX}(\mu = \Delta t) - R_{XX}(\mu = 2\Delta t)] \quad (3.17)$$

Поэтому можно считать справедливым равенство:

$$R_{XX}(\mu = 0) - R_{XX}(\mu = \Delta t) \approx R_{XX}(\mu = \Delta t) - R_{XX}(\mu = 2\Delta t). \quad (3.18)$$

Следовательно, можно написать

$$R_{XX}(\mu = 0) \approx 2R_{XX}(\mu = \Delta t) - R_{XX}(\mu = 2\Delta t). \quad (3.19)$$

Если принять во внимание равенства

$$\left. \begin{aligned} R_{gg}(\mu = 1) &\approx R_{XX}(\mu = 1) \\ R_{gg}(\mu = 2) &\approx R_{XX}(\mu = 2) \end{aligned} \right\}, \quad (3.20)$$

то с учетом (3.13), (3.15), (3.18)-(3.20) будем иметь:

$$D_{\varepsilon} \approx R_{gg}(\mu = 0) + R_{gg}(\mu = 2) - 2R_{gg}(\mu = 1). \quad (3.21)$$

Иначе говоря, при выполнении условий (3.13), (3.17)–(3.20) выражение определения оценки величин помехокорреляции  $D_{\varepsilon}$  можно представить в виде:

$$D_{\varepsilon} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)]. \quad (3.22)$$

Понятно, что, зная оценку  $D_{\varepsilon}$ , формулу для вычисления дисперсии полезного сигнала можно представить в виде:

$$D_X = D_g - D_{\varepsilon}. \quad (3.23)$$

В выражении (3.21) оценку  $R_{gg}(\mu = 0)$  можно представить в виде:

$$R_{gg}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t) \cdot \varepsilon(i\Delta t)] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) \quad (3.24)$$

Принимая обозначения

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) = R_{XX}(\mu = 0), \quad (3.25)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)] = 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0), \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) = D_{\varepsilon}, \quad (3.27)$$

выражение (3.24) можно представить в виде:

$$R_{gg}(\mu = 0) = R_{XX}(\mu = 0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0). \quad (3.28)$$

Благодаря этому выражение (3.21) можно привести к виду:

$$D_{\varepsilon} = R_{gg}(\mu = 2) - 2R_{gg}(\mu = 1) + R_{XX}(\mu = 0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0). \quad (3.29)$$

Принимая во внимание, что

$$R_{gg}(\mu = 1) = R_{XX}(\mu = 1) \quad (3.30)$$

$$R_{gg}(\mu = 2) = R_{XX}(\mu = 2)$$

$$R_{XX}(\mu = 0) + R_{XX}(\mu = 2) = 2R_{XX}(\mu = 1) \quad (3.31)$$

можно допускать справедливость равенств.

$$R_{gg}(\mu = 2) - 2R_{gg}(\mu = 1) + R_{XX}(\mu = 0) = 0 \quad (3.32)$$

Следовательно, формулы (3.21), (3.22) вычисления  $D_{\varepsilon}$  можно привести к виду:

$$\left. \begin{aligned} D_{\varepsilon} &= 2R_{X\varepsilon}(\mu=0) + R_{\varepsilon}(\mu=0) = 2R_{X\varepsilon}(\mu=0) + D_{\varepsilon} \\ D_{\varepsilon} &= D_{\varepsilon} - 2R_{X\varepsilon}(\mu=0) \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

По выражению (3.22) можно вычислить оценки  $D_{\varepsilon}$ . Однако, применение этой формулы не позволяет определить оценку  $R_{X\varepsilon}(\mu=0)$ . В связи с этим рассмотрим более подробно возможность ее определения при помощи технологий вычисления оценок релейных корреляционных функций  $R_{gg}^*(\mu=0)$ . Для этого принимая обозначения

$$\operatorname{sgn} g(i\Delta t) = \begin{cases} +1 & \text{при } g(i\Delta t) \geq 0 \\ -1 & \text{при } g(i\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (3.34)$$

допуская равенство:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} \varepsilon(i\Delta t) \cdot \varepsilon(i+\mu) &= 0 & \text{при } \mu \neq 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} \varepsilon(i\Delta t) \cdot \varepsilon(i\Delta t) &\neq 0 & \text{при } \mu = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

формулу определения оценок релейной корреляционной функции  $R_{gg}^*(\mu=0)$  представим в виде:

$$\begin{aligned} R_{gg}^*(\mu=0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) g(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot X(i\Delta t)] + [\operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot \varepsilon(i\Delta t)] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) X(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} g(i\Delta t) \cdot \varepsilon(i\Delta t) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} X(i\Delta t) X(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn} X(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t) = R_{XX}^*(\mu=0) + R_{X\varepsilon}^*(\mu=0). \end{aligned} \quad (3.36)$$

Из литературы [20-24] известно, что при отсутствии корреляции между  $X(i\Delta t)$  и  $\varepsilon(i\Delta t)$  с учетом условий (3.34), (3.34) для оценок релейной корреляционной функции можно считать справедливыми следующие приближенные равенства:

$$\begin{aligned} R_{gg}^*(\mu=0) - R_{gg}^*(\mu=1) &\approx R_{gg}^*(\mu=1) - R_{gg}^*(\mu=2) \approx \\ &\approx R_{gg}^*(\mu=2) - R_{gg}^*(\mu=3) \approx R_{gg}^*(\mu=3) - R_{gg}^*(\mu=4), \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} R_{XX}^*(\mu=0) - R_{XX}^*(\mu=1) &\approx R_{XX}^*(\mu=1) - R_{XX}^*(\mu=2) \approx \\ &\approx R_{XX}^*(\mu=2) - R_{XX}^*(\mu=3) \approx R_{XX}^*(\mu=3) - R_{XX}^*(\mu=4), \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\Delta R_{gg}^*(\mu=0) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=1) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=2) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=3). \quad (3.39)$$

$$\Delta R_{XX}^*(\mu=0) \approx \Delta R_{XX}^*(\mu=1) \approx \Delta R_{XX}^*(\mu=2) \approx \Delta R_{XX}^*(\mu=3) \quad (3.40)$$

В то же время для случая, когда имеет место корреляция между  $X(i\Delta t)$  и  $\varepsilon(i\Delta t)$ , можно считать справедливыми следующие выражения:

$$\Delta R_{gg}^*(\mu=0) - \Delta R_{gg}^*(\mu=1) \neq \Delta R_{gg}^*(\mu=1) - \Delta R_{gg}^*(\mu=2), \quad (3.41)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{gg}^*(\mu=1) - \Delta R_{gg}^*(\mu=2) &\approx \Delta R_{gg}^*(\mu=2) - \Delta R_{gg}^*(\mu=3) \approx \Delta R_{gg}^*(\mu=3) - \Delta R_{gg}^*(\mu=4) \approx 0 \\ \Delta R_{XX}^*(\mu=1) - \Delta R_{XX}^*(\mu=2) &\approx \Delta R_{XX}^*(\mu=2) - \Delta R_{XX}^*(\mu=3) \approx \Delta R_{XX}^*(\mu=3) - \Delta R_{XX}^*(\mu=4) \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.42)$$

Из равенства (3.36) следует, что оценку релейной взаимно корреляционной функции  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$  можно определить из формулы:

$$R_{gg}^*(\mu = 0) \approx R_{XX}^*(\mu = 0) + R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0), \quad (3.43)$$

$$R_{X\varepsilon}^*(0) \approx R_{gg}^*(\mu = 0) - R_{XX}^*(\mu = 0). \quad (3.44)$$

Следовательно, для вычисления  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$  по выражению (3.44) необходимо определить  $R_{XX}^*(\mu = 0)$ . Из равенств (3.36)-(3.41) следует, что оценку  $R_{XX}^*(\mu = 0)$  можно вычислить по следующему выражению:

$$R_{XX}^*(\mu = 0) \approx R_{XX}^*(\mu = 1) + \Delta R_{XX}^*(\mu = 1) \approx R_{gg}^*(\mu = 1) + \Delta R_{gg}^*(\mu = 1) \approx R_{gg}^*(\mu = 1) + [R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2)] = 2R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2). \quad (3.45)$$

Таким образом, выражение (3.44) можно представить в виде:

$$R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0) = R_{gg}^*(\mu = 0) - [2R_{gg}^*(\mu = 1) - R_{gg}^*(\mu = 2)] = R_{gg}^*(\mu = 0) - 2R_{gg}^*(\mu = 1) + R_{gg}^*(\mu = 2). \quad (3.46)$$

Следовательно, выражение для вычисления оценки релейной взаимно корреляционной функции  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$  между полезным сигналом  $X(i\Delta t)$  и ее помехой  $\varepsilon(i\Delta t)$  можно представить в следующем виде:

$$R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\text{sgn } g(i\Delta t)g(i\Delta t) - 2\text{sgn } g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) + \text{sgn } g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t)]. \quad (3.47)$$

Легко можно убедиться в том, что располагая оценкой  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$  не трудно вычислить оценку  $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ . Из литературы [20-23] известно, что располагая оценками  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ ,  $R_{gg}^*(\mu = 1)$ ,  $R_{gg}(\mu = 1)$  и используя соотношения между  $R_{gg}^*(\mu = 1)$  и  $R_{gg}(\mu = 1)$  можно допустить справедливость нижеследующего равенства

$$\frac{R_{gg}^*(\mu = 1)}{R_{gg}(\mu = 1)} = \frac{R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)}{R_{X\varepsilon}(\mu = 0)}, \quad (3.48)$$

из которого можно по формуле

$$R_{X\varepsilon}(\mu = 0) = \frac{R_{gg}(\mu = 1)R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)}{R_{X\varepsilon}^*(\mu = 1)} \quad (3.49)$$

определить оценку  $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ .

Понятно, что располагая оценками  $R_{gg}(\mu = 1)$  и  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 1)$  и определяя оценку  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$  по выражению (3.47), (3.49) легко можно вычислить  $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ . При этом по выражению

$$D_{\varepsilon} = D_{\varepsilon} - 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \quad (3.50)$$

определяется оценка  $D_{\varepsilon}$ .

Таким образом, по формулам (3.22), (3.33), (3.47), (3.49) имеется возможность определения оценок  $D_{\varepsilon}$ ,  $D_{\varepsilon}$ ,  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$  и  $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$  соответственно. Благодаря этому открывается возможность корректировать погрешности процедуры нормирования по выражениям (3.6) и (3.9).

Порядок выполнения процедуры нормирования оценок корреляционных функций.

Технология вычисления оценок  $D_{\varepsilon}$ ,  $D_{\varepsilon}$ ,  $R_{X\varepsilon}^*(\mu = 0)$ ,  $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$  открывает возможности применение формул (3.6) и (3.9) для исключения дополнительной погрешности, которая возникает при применении традиционных технологий нормирования.



Ниже предлагается соответствующая последовательность вычислительных технологий, совокупность которых составляет процедуру нормирования автокорреляционных функции.

1) По выражениям (2.8) вычисляются оценки  $R_{gg}(\mu)$ .

2) По выражению (3.47) определяется оценка  $R_{X\varepsilon}^*(\mu=0)$ .

3) По выражению  $R_{X\varepsilon}(\mu=0) = \frac{R_{gg}(\mu=1)R_{X\varepsilon}^*(\mu=0)}{R_{gg}^*(\mu=1)}$  определяется оценка  $R_{X\varepsilon}(\mu=0)$ .

4) Определяется величина помехокорреляции  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  и дисперсия помехи  $D_\varepsilon$  по выражениям

$$D_{\varepsilon\varepsilon} = D(\varepsilon) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t)], \quad (3.51)$$

$$D_\varepsilon = D_{\varepsilon\varepsilon} - 2R_{X\varepsilon}. \quad (3.52)$$

5) Для случая, когда имеется корреляция между полезным сигналом  $X(t)$  и помехой  $\varepsilon(t)$ , т.е. когда выполняются условия  $R_{X\varepsilon}(\mu=0) \neq 0$ , оценки нормированной автокорреляционной функции при временных сдвигах  $\mu=0, \mu=\Delta t, \mu=2\Delta t, \mu=3\Delta t, \dots$  вычисляются по выражению:

$$r_{gg}(\mu) = \begin{cases} \frac{R_{gg}(\mu=0)}{R_{gg}(\mu=0)} = 1 & \text{при } \mu=0 \\ \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{gg}(0) - 2R_{X\varepsilon}(0) - D_\varepsilon} & \text{при } \mu \neq 0 \end{cases}, \quad (3.53)$$

6) Для случая, когда отсутствует корреляция между полезным сигналом  $X(t)$  и помехой  $\varepsilon(t)$ , т.е. выполняются условия  $R_{X\varepsilon}(0)=0$ , тогда формула вычисления оценки нормированных автокорреляционных функций имеет вид:

$$r_{gg}^R(\mu) = R_{gg}(\mu) / (D_{gg} - D_\varepsilon), \quad (3.54)$$

где  $D_\varepsilon$  определяется по выражению (3.51), так как в этом случае имеет место равенство  $D_\varepsilon \approx D_{\varepsilon\varepsilon}$ .

Последовательность технологии вычисления оценок нормированных взаимно корреляционных функций можно представить следующим образом:

1) вычисляются оценки взаимно корреляционной функции по выражению (2.9);

2) вычисляются приближенные оценки взаимно корреляционных функций  $R_{X\varepsilon}^*(\mu=0)$ ,

$R_{Y\varphi}^*(\mu=0)$  между полезными сигналами  $X(t), Y(t)$  и помехами  $\varepsilon(t), \varphi(t)$  при нулевом временном сдвиге  $\mu=0$  по выражениям типа (3.49), т.е.

$$R_{X\varepsilon}(\mu=0) = \frac{R_{gg}(\mu=1)R_{X\varepsilon}^*(\mu=0)}{R_{gg}^*(\mu=1)} \quad R_{Y\varphi}(\mu=0) = \frac{R_{\eta\eta}(\mu=1)R_{Y\varphi}^*(\mu=0)}{R_{\eta\eta}^*(\mu=1)}; \quad (3.55)$$

3) оценки  $D_{\varepsilon\varepsilon}$  и  $D_{\varphi\varphi}$  определяются по выражению (3.22).

4) оценки  $D_\varepsilon$  и  $D_\varphi$  определяются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} D_\varepsilon &= D_{\varepsilon\varepsilon} - 2R_{X\varepsilon} \\ D_\varphi &= D_{\varphi\varphi} - 2R_{Y\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

5) для случая, когда имеется корреляция между полезными сигналами  $X(t), Y(t)$  и помехами

$\varepsilon(t)$ ,  $\varphi(t)$  вычисляются оценки нормированной взаимно корреляционной функции  $r_{g\eta}^R(\mu)$  при временных сдвигах  $\mu=0, \mu=\Delta t, \mu=2\Delta t, \mu=3\Delta t, \dots$  по выражению:

$$r_{g\eta}^R(\mu) = \frac{R_{g\eta}(\mu)}{\sqrt{\left[ R_{gg}(0) - 2R_{g\varepsilon}(0) - D_\varepsilon \right] \left[ R_{\eta\eta}(0) - 2R_{\eta\varphi}(0) - D_\varphi \right]}}; \quad (3.57)$$

б) для случая, когда отсутствует корреляция между полезными сигналами  $X(t)$ ,  $Y(t)$  и помехами  $\varepsilon(t)$ ,  $\varphi(t)$ , оценки нормированной взаимно-корреляционной функции  $r_{g\eta}^R(\mu)$  при временных сдвигах  $\mu=0, \mu=\Delta t, \mu=2\Delta t, \mu=3\Delta t, \dots$  определяются по выражению:

$$r_{g\eta}^R(\mu) = R_{g\eta}(\mu) / \sqrt{(D(g) - D_\varepsilon)} \sqrt{(D(\eta) - D_\varphi)}. \quad (3.58)$$

Таким образом, предлагаемая процедура нормирования по вышеуказанной технологии позволяет исключить погрешности помехи.

Ниже для широкого практического применения предлагается технология нормирования, которая выполняется при помощи достаточно легко реализуемой формулы

$$r_{gg}(\mu \neq 0) = \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{gg}(\mu = 0) - D_\varepsilon}. \quad (3.59)$$

Простота и доступность процедуры нормирования по этой формуле иллюстрируется ниже при помощи вычислительного эксперимента.

1. Формируем зашумленный сигнал  $g(t)$  (рис.1-синяя кривая) из синусоиды  $X(t) = A \sin(t)$  (рис1-зеленый цвет) и помехи  $\varepsilon(t)$  (рис.1-красная кривая), так, чтобы выполнялось условие  $D_\varepsilon \approx 0.1D_X$ .

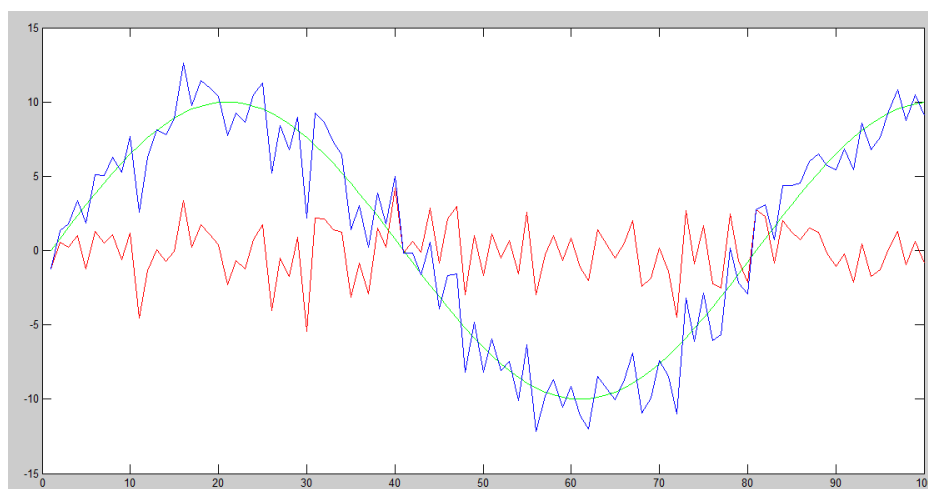
На графике приведены первые 100 отсчетов сигналов  $g(t)$ ,  $X(t)$ ,  $\varepsilon(t)$  ( $A = 10$ ;  $t = 0 : \pi/40 : 120 * \pi - \pi/40$ ;  $\varepsilon = \text{normrnd}(0, 2, 1, 4800)$ ).

2. Как для  $g(t)$ , так и для  $\varepsilon(t)$  по формулам

$$D_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t) g(i\Delta t)$$

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) \varepsilon(i\Delta t)$$

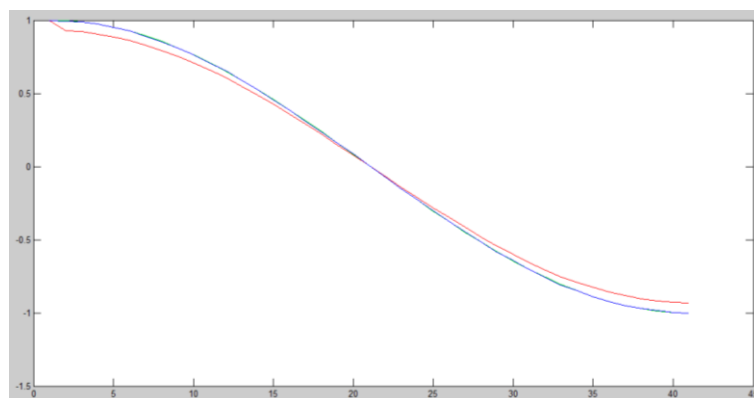
определяем оценки  $D_g = 55.229$  и  $D_\varepsilon = 3.9064$



**Рис.1** График зашумленного сигнала  $g(t) = X(t) + \varepsilon(t)$

3. По выражению (3.22) определяем оценку  $D_{\varepsilon} = 3.8508$

4. По формуле  $r_{XX}(\mu) = \frac{R_{XX}(\mu)}{R_{XX}(\mu = 0)}$  выполняем процедуру нормирования и строим ее график  $\mu = 0, 1\Delta t, 2\Delta t, \dots$  (рис 2, зеленая кривая).



**Рис. 2** График сравнения результатов нормирования по традиционной и noise технологиям

5. По формуле  $r_{gg}(\mu) = \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{gg}(\mu = 0)}$  выполняем традиционную процедуру нормирования и строим график  $r_{gg}(\mu)$  (рис 2, красная кривая).

6. По формуле  $r_{gg}^*(\mu) = \frac{R_{gg}(\mu)}{R_{gg}(\mu = 0) - D_{\varepsilon}}$  выполняем предложенную процедуру нормирования и строим ее график (рис 2, синяя кривая).

На таблице 1 приведены результаты полученных оценок.

**Табл. 1**

Результаты оценок нормированной автокорреляционной функции полезного сигнала  $r_{XX}(\mu)$ , нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала  $r_{gg}(\mu)$ , нормированной автокорреляционной функции зашумленного сигнала по noise технологии  $r_{gg}^*(\mu)$ .

$\mu\Delta t$	$r_{xx}(\mu)$	$r_{gg}(\mu)$	$r_{gg}^*(\mu)$	$\mu\Delta t$	$r_{xx}(\mu)$	$r_{gg}(\mu)$	$r_{gg}^*(\mu)$
0	1	1	1	21	-0.0731	-0.0688	-0.0740
1	0.9973	0.9256	0.9950	22	-0.1512	-0.1410	-0.1516
2	0.9885	0.9214	0.9905	23	-0.2282	-0.2122	-0.2281
3	0.9736	0.9055	0.9734	24	-0.3039	-0.2813	-0.3024
4	0.9527	0.8854	0.9517	25	-0.3777	-0.3485	-0.3746
5	0.9259	0.8615	0.9261	26	-0.4492	-0.4156	-0.4468
6	0.8934	0.8292	0.8913	27	-0.5179	-0.4816	-0.5177
7	0.8554	0.7944	0.8539	28	-0.5835	-0.5434	-0.5842
8	0.8121	0.7525	0.8089	29	-0.6454	-0.5985	-0.6434
9	0.7639	0.7095	0.7627	30	-0.7033	-0.6552	-0.7043
10	0.7109	0.6593	0.7088	31	-0.7569	-0.7064	-0.7594
11	0.6535	0.6092	0.6549	32	-0.8059	-0.7530	-0.8094
12	0.5921	0.5479	0.5889	33	-0.8498	-0.7901	-0.8493
13	0.5270	0.4903	0.5270	34	-0.8886	-0.8267	-0.8886
14	0.4587	0.4252	0.4571	35	-0.9218	-0.8565	-0.9207
15	0.3876	0.3598	0.3867	36	-0.9494	-0.8829	-0.9490
16	0.3141	0.2905	0.3123	37	-0.9711	-0.9040	-0.9718
17	0.2386	0.2201	0.2366	38	-0.9868	-0.9164	-0.9851
18	0.1617	0.1481	0.1592	39	-0.9965	-0.9261	-0.9955
19	0.0838	0.0789	0.0848	40	-1.0000	-0.9315	-1.0013
20	0.0053	0.0048	0.0052				

Как видно из полученных результатов графики  $r_{xx}(\mu)$  и график  $r_{gg}^*(\mu)$  практически совпадают. В то же время график  $r_{gg}(\mu)$  из-за погрешности процедуры нормирования значительно отличается от истинных значений. Таким образом, целесообразность практического применения предложенной технологии процедуры нормирования очевидна.

**4. Выводы.** Анализ традиционной процедуры нормирования оценок корреляционных функций технологических процессов показал, что при его выполнении в полученные нормированные оценки вносятся значительные погрешности.

В то же время почти у всех реальных промышленных объектов, как правила входные и выходные технологические параметры являются такими физическими величинами как расход, давления, температура, скорость и т.д. Поэтому при решении многочисленных задач контроля, диагностики, идентификации, оптимизации и управления с применением статистических методов возникает необходимость применения процедуры нормирования. Появление погрешности при этом становится основной причиной, приводящей к нарушениям адекватности полученных результатов. Отметим, что на первый взгляд применение фильтрации, которое нашло широкое применение должно позволить устранить всевозможные погрешности, возникающие от влияния помехи. Однако в реальных объектах помехи технологических процессов формируются под влиянием различных факторов. Некоторые из них косвенно отражают определенные процессы, происходящие на исследуемых объектах. Из-за этого нередко диапазон спектра помехи пересекается со спектром полезного сигнала. Кроме того, спектр помехи и полезного сигнала в реальных технологических параметрах не является строго стабильным. По этим причинам в процесс фильтрации не всегда достигается желаемый результат. Иногда даже имеет место искажение спектра полезного сигнала. Поэтому предложенные методы и технологии устранения погрешности нормирования имеют важное прикладное значение. Решение этой задачи имеет также значительное теоретическое значение, так как предложенная технология открывает возможности улучшения адекватности результатов решения задачи диагностики, идентификации в системах контроля и управления технологическими процессами.

#### Литература

1. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа – М.: Мир, 1983, 312
2. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М., Физматгиз, 1960, 665 с.
3. Li Tan, Jean Jiang. Chapter 1 – Introduction to Digital Signal Processing // Digital Signal Processing. February, 2013, Pages 1–13.
4. Gang Li, Limin Meng, Zhijiang Xu, Jingyu Hua. A novel digital filter structure with minimum roundoff noise // Digital Signal Processing, Volume 20, Issue 4, July 2010, Pages 1000–1009.
5. Marcelo Oliveira Camponez, Ana Cristina Staut Simmer, Mario Sarcinelli-Filho. Low-noise zero-input, overflow, and constant-input limit cycle-free implementation of state space digital filters // Digital Signal Processing, Volume 17, Issue 1, January 2007, Pages 335–344.
6. Nurhan Karabogaa, Fatma Latifoglua. Elimination of noise on transcranial Doppler signal using IIR filters designed with artificial bee colony – ABC-algorithm // Digital Signal Processing, Volume 23, Issue 3, May 2013, Pages 1051–1058.
7. M. Yaseen. Robust and direct design for highpass ladder wave digital filters exhibiting equiripple characteristics // Digital Signal Processing, Volume 23, Issue 3, May 2013, Pages 1059–1064.
8. S.K. Sindhi, K.M.M. Prabhu. Reconstruction of N-th order nonuniformly sampled bandlimited signals using digital filter banks // Digital Signal Processing, Available online 27 June 2013.
9. Abdullah Topraka, İnan Gülerb. Impulse noise reduction in medical images with the use of switch mode fuzzy adaptive median filter // Digital Signal Processing. Volume 17, Issue 4, July 2007, Pages 711–723.
10. Qingbo He, Jun Wang. Effects of multiscale noise tuning on stochastic resonance for weak signal detection // Digital Signal Processing Volume 22, Issue 4, July 2012, Pages 614–621.
11. Dimitris A. Padosa, Michael J. Medleyb, Stella N. Batalamaa. Adaptive Antenna Array Receivers for Spread-Spectrum Signals in Non-Gaussian Noise // Digital Signal Processing, Volume 11, Issue 2, April 2001, Pages 144–158.
12. Fabing Duana, François Chapeau-Blondeaub, Derek Abbottc. Weak signal detection: Condition for noise induced enhancement // Digital Signal Processing. Volume 23, Issue 5, September 2013, Pages 1585–1591.
13. Youguo Wang. Nonlinear statistics to improve signal detection in generalized Gaussian noise // Digital Signal Processing, Volume 18, Issue 3, May 2008, Pages 444–449.
14. Jingyu Huaa, Limin Menga, Zhijiang Xua, Gang Lia. An adaptive signal-to-noise ratio estimator in mobile communication channels // Digital Signal Processing, Volume 20, Issue 3, May 2010, Pages 692–698.
15. Daifeng Zha, Tianshuang Qiu. Underwater sources location in non-Gaussian impulsive noise environments // Digital Signal Processing. Volume 16, Issue 2, March 2006, Pages 149–163.
16. Petre Stoica, Monika Agrawal, Per Åhrgren. Array processing for signals with non-zero means in colored noise fields // Digital Signal Processing, Volume 14, Issue 4, July 2004, Pages 296–311.
17. Elif Derya Übeyli. Noise cancellation in Doppler ultrasound signals with adaptive neuro-fuzzy inference system // Digital Signal Processing, Volume 20, Issue 1, January 2010, Pages 63–76.
18. Elif Derya Übeyli. Measuring saliency of features extracted by model-based methods from internal carotid arterial Doppler signals using signal-to-noise ratios // Digital Signal Processing, Volume 18, Issue 1, January 2008, Pages 2–14.
19. J.S. Armand Eyebe Fouda, Martin Kom, Samuel Domngang. The EKT method theoretical signal-to-noise ratio expression // Digital Signal Processing, Volume 17, Issue 4, July 2007, Pages 808–818.
20. T.A. Aliev, A.M. Abbasov, G.A. Guluyev, F.H. Pashayev, U.E. Sattarova. System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 53, October 2013, pp. 11-15.
21. T.A. Aliev, G.A. Guluyev, F.H. Pashayev, A.B. Sadygov. Noise monitoring technology for objects in transition to the emergency state // Mechanical Systems and Signal Processing, page 755-762, 2012.
22. Telman Aliev, Digital Noise Monitoring of Defect Origin. Springer. London (2007), 235 p.
23. Telman Aliev, Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (2003), 199 p.
24. T.A. Aliev, N.F. Musayeva and U.E. Sattarova. Robust technologies for calculating normalized correlation functions // Cybernetics and Systems Analysis, Springer New York, No.1, 2010, pp. 153-166.

**UOT 519.216**

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

**Korrelyasiya funksiyalarının normallaşdırılması zamanı əmələ gələn xətaları aradan götürən noise  
texnologiyalar**

Göstərilib ki, texnoloji parametrlərin monitoring, nəzarət, diaqnostika, identifikasiya, idarəetmə, və s. məsələlərinin həllində real avto və qarşılıqlı korrelyasiya funksiyalarının qiymətlərinin normallaşdırılması üçün işlənən ənənəvi texnologiyaların tətbiqi zamanı alınmış nəticələrin dəqiqliyinə mühüm təsir göstərən əlavə xətlər yaranır. Bu xətlərin küy və faydalı siqnal arasında korrelyasiyanın mövcüd olub olmaması halları üçün yaranma mənbələri təhlil edilir. Küyün nəticəsində yaranan xətlərin xaric etməyə imkan verən avto və qarşılıqlı korrelyasiya funksiyalarının qiymətlərinin normallaşdırılması üçün analitik ifadələr çıxarılmışdır, küy ilə faydalı siqnal arasındakı dispersiya və qarşılıqlı korrelyasiya funksiyasının cəmindən ibarət olan küy korrelyasiya ölçüsünün qiymətlərinin hesablanması üçün alqoritmləri təklif edilmişdir.

**Açar sözlər:** stoxastik proses, texnoloji parametr, küylü siqnal, korrelyasiya funksiyası, normallaşdırılmış qiymətlər

**T.A. Aliev, N.F. Musaeva, U.E. Sattarova, T.A. Alizada, N.E. Rzayeva**

#### **Noise technology for correcting the error caused by the normalization of correlation functions**

*It is demonstrated that in solving the problems of monitoring, control, diagnostics, identification, management etc., the use of the conventional technology for normalizing the estimates of auto- and cross-correlation functions causes additional errors that have a significant effect on the accuracy of the results. We analyze the sources of errors of correlation functions of noisy continuous random signals both in the presence of a correlation between the noise and the useful signal and in the absence of such. Algorithms and technologies are proposed for correcting the errors caused by noises in the process of normalizing the estimates of auto- and cross-correlation functions.*

**Keywords:** stochastic process, technological parameter, noisy signal, correlation function, normalized estimates