

Т. А. Алиев<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, академик, telmancyber@gmail.com,

Н. Ф. Мусаева<sup>2</sup>, д-р техн. наук, musanaila@gmail.com,

Б. И. Газызаде<sup>1</sup>, диссертант, behruz.qazizade@gmail.com

<sup>1</sup>Институт систем управления НАН Азербайджана, г. Баку

<sup>2</sup>Азербайджанский архитектурно-строительный университет, г. Баку

## Технологии мониторинга динамики развития повреждений на буровых установках с использованием моментов высоких порядков помехи<sup>1</sup>

*Статья посвящена разработке алгоритмов вычисления моментов высоких порядков помехи зашумленных сигналов и их применению для анализа технического состояния промышленных объектов. Показано, что для мониторинга и контроля начала аварийной ситуации объектов нефтедобычи используются случайные вибрационные сигналы, которые, помимо помехи от внешних факторов в момент зарождения неисправности, также содержат дополнительную помеху. Характеристики этой помехи несут в себе определенную информацию о техническом состоянии бурильного станка. Ранее были разработаны алгоритмы вычисления дисперсии, среднего квадратического отклонения, функции плотности распределения помехи, которую невозможно отделить от зашумленного сигнала. В данной работе показано, что моменты высоких порядков помехи можно использовать как диагностический индикатор для определения наличия и степени развития повреждений буровых установок во времени в скрытом периоде зарождения.*

*Проведен анализ возможных вариантов вычисления моментов высоких порядков помехи. Разработаны рекуррентные алгоритмы, выражающие моменты высших порядков нормально распределенной помехи через ее дисперсию. Показана возможность вычисления моментов высоких порядков помехи также через функции плотности распределения.*

*Составлена матрица, состоящая из оценок моментов высоких порядков помехи (noise-моментов), вычисленных в различные моменты времени. Показано, что на первом этапе по значениям элементов матрицы удастся определить наличие и степень зародившегося повреждения. На втором этапе находится интенсивность развития повреждения в результате сравнения значений характеристик помехи в различные моменты времени. Вычисления проводятся для всех сигналов, которые поступают от датчиков. Проводится обучение, и по значениям моментов высших порядков ставятся в соответствие определенная степень и интенсивность развития повреждения.*

*Показана возможность использования предложенных алгоритмов и технологий в системе контроля помех (noise-контроля) начала развития и динамики аварий на буровых установках. Отмечено, что в процессе бурения, если даже оценки моментов высоких порядков суммарных зашумленных вибросигналов меняются в большом диапазоне, их noise-моменты высоких порядков не превышают заданной величины при отсутствии неисправности. При возникновении неисправности оценки моментов помехи становятся больше заданного порогового уровня и по мере развития дефекта их значения также изменяются. Если неблагоприятные процессы стабилизируются, измерение во времени этих оценок прекращается, причем в зависимости от степени и интенсивности стабилизации технического состояния буровой установки поочередно прекращается измерение оценок моментов, начиная от самого высокого до самого низкого или наоборот. Эта специфика оценок noise-моментов высоких порядков вибрационных сигналов позволяет определить начало и контролировать динамику развития скрытого периода аварийного состояния процесса бурения.*

**Ключевые слова:** зашумленный сигнал, помеха, характеристики помехи, моменты высокого порядка помехи, буровая установка, система контроля

### Введение

Известно, что аварии, которые происходят при бурении нефтяных скважин, приводят не только к огромному материальному, но и к экологическому ущербу. Поэтому возникает необходимость в разработке эффективных тех-

нологий и систем повышения степени безопасности процесса бурения [1].

В настоящее время применяется вращательное бурение, при котором породоразрушающий инструмент получает вращение через колонну бурильных труб от специального механизма (шпинделя вращателя или ротора) или от забойного двигателя.

Для эффективного протекания процесса бурения создаются системы мониторинга, контроля, диагностики и управления. Все эти системы в реальном масштабе времени осуществляют сбор и обработку информации, получаемой

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Научно-го Фонда Государственной Нефтяной Компании Азербайджанской Республики "SOCAR" в рамках научного проекта: "Разработка системы, обеспечивающей адекватность идентификации и раннюю диагностику нефтяных установок на основе позиционно-бинарной технологии".

с соответствующих датчиков, осуществляют непрерывный контроль и управление полным технологическим циклом строительства скважины, выполняют прогнозирование для своевременного предотвращения аварийных ситуаций [1, 2].

Основными параметрами, которые необходимо контролировать при бурении глубоких скважин, являются: вес на крюке, давление промывочной жидкости на входе в скважину, плотность промывочной жидкости на входе в скважину, крутящий момент ротора, расход промывочной жидкости на выходе из скважины, расход промывочной жидкости на входе в скважину, скорость спускоподъемных операций, механическая скорость бурения, температура на выходе из скважины и т.д. [1, 2].

Несмотря на использование вышеуказанных систем, число аварий в настоящее время не уменьшается. Это связано с тем, что механизм возникновения аварий при бурении скважин имеет такие специфические особенности, как скоротечность, труднодоступность для инструментального контроля, размытость и неоднозначность наблюдаемых симптомов, региональная зависимость [1–5]. Кроме того, на технологический процесс бурения влияют случайные внешние воздействия, которые искажают результаты измерений параметров. Искажения значений полезных сигналов помехой происходят из-за разнообразия геологических условий бурения, вследствие появления нагрузки на крюке, изменения крутящего момента, затрат мощности, механической скорости бурения и др. [1].

Отсюда следует, что основные технологические параметры бурения представляют собой случайные функции. В то же время применяемые на сегодняшний день на практике методы, алгоритмы и технологии анализа стохастических процессов не всегда обеспечивают своевременное предупреждение о возможности аварий при бурении скважин и нуждаются в совершенствовании. Поэтому считается, что эффективность и безопасность бурения при применении существующих систем в значительной степени зависят от квалификации мастера-бурильщика, а также состояния его здоровья, усталости, утомляемости и даже настроения. Например, анализ статистики времени аварии показывает, что многие катастрофы на буровых установках происходили в ночное время, когда мастер-бурильщик находился в бессонном и утомленном состоянии. Поэтому необходимо создание новых алгоритмов и технологий, которые позволили бы выявить начало скрытого периода возникновения дефекта, предшествующего возник-

новению аварии, определить степень возникшей неисправности и динамику ее развития. Своевременная сигнализация и оповещение мастера о возникшей опасности позволят обеспечить высокую надежность и безопасность процесса бурения независимо от квалификации и состояния здоровья бурильщика [1].

### Постановка задачи

Для контроля состояния бурильной установки можно предложить три варианта контроля информативных параметров [1–5].

В *первом варианте* для широко распространенного вращательного бурения в качестве контролируемых параметров процесса бурения выбираются частота вращения долота, крутящий момент на шпинделе вращателя бурильного станка, крутящий момент на роторе бурильного станка, механическая скорость бурения и осевая нагрузка на долото. В традиционных системах контроля информация об этих параметрах, получаемая от соответствующих датчиков, как правило, используется для предотвращения аварийных ситуаций.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что те процессы, которые являются причинами отклонений от нормального режима бурения, также косвенно отражаются на вибрационном состоянии таких основных частей установки бурения, как стол ротора, верх буровой вышки, середина каркаса станка и т.д. Высококвалифицированные опытные мастера-бурильщики практически безошибочно на ощупь, по вибрационному состоянию этих частей буровой установки, определяют начало возможных аварий. Поэтому для контроля начала аварийной ситуации во *втором варианте* используются вибрационные сигналы, получаемые от датчиков, установленных на указанных узлах бурильного станка.

В *третьем варианте* решения этой задачи предлагается совмещать первые два варианта, благодаря чему достигается большая надежность и достоверность результатов определения возможной аварийной ситуации [1–5]. В данной работе предлагается алгоритм решения задачи выявления раннего скрытого периода возникновения аварийной ситуации, основанный на контроле и анализе вибрационных сигналов бурильной установки, отмеченных во втором варианте.

В работах [1–10] отмечено, что в процессе эксплуатации оборудование подвергается различным видам повреждений и разрушений на-

пример, механическим, коррозионным, тепловым и т.д. При этом повреждениями считаются трещины, поломки, пробоины, деформации и т.д. В начальный период времени эти повреждения имеют микроскопические размеры. Но со временем эти трещины распространяются вглубь, охватывают значительную часть оборудования. В этом случае следует оценить интенсивность появления и развития дефектов. Иначе говоря, необходимо определить динамику развития повреждений, сделать соответствующие выводы о том, как развивается повреждение (например, повреждение возрастает неравномерно, повреждение развивается с небольшой равномерной интенсивностью, повреждение характеризуется интенсивным развитием и т.д.), и вовремя принять соответствующие меры. Это позволит избежать перехода бурильного оборудования к предельному состоянию, при котором дальнейшее его применение недопустимо или нецелесообразно [1–10].

Поэтому возникает задача обнаружения раннего скрытого периода появления повреждений бурильного оборудования и определения динамики их развития. В работах [1, 2] было показано, что в системах мониторинга, контроля, диагностики, прогноза, управления, идентификации и т.д. сигналы, которые поступают от соответствующих датчиков, помимо помехи  $\varepsilon_1(t)$  от внешних факторов в момент зарождения неисправности содержат также дополнительную помеху  $\varepsilon_2(t)$ , которая добавляется к  $\varepsilon_1(t)$ :

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

Помеха  $\varepsilon(t)$  накладывается на полезный сигнал  $x(t)$ , и в результате от датчика, который расположен в информативных узлах оборудования, поступает зашумленный сигнал  $g(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ . В работах [1–13] было отмечено, что характеристики помехи несут в себе определенную информацию о техническом состоянии бурильного станка. Поэтому в качестве информативных признаков для определения начала скрытого периода возникновения аварийной ситуации бурильной установки можно использовать характеристики помехи  $\varepsilon(t)$ .

Поэтому ранее в работах [1–13] были разработаны алгоритмы вычисления дисперсии, среднего квадратического отклонения, функции плотности распределения помехи  $\varepsilon(t)$ , которую невозможно отделить от зашумленного сигнала  $g(t)$  [14, 15].

В данной работе показано, что моменты высоких порядков помехи можно использовать для прослеживания динамики развития повреждения буровых установок на ранней ста-

дии. Поэтому ниже предлагаются алгоритмы вычисления моментов высокого порядка помехи как диагностического индикатора определения наличия и степени развития повреждений буровых установок во времени в скрытом периоде зарождения.

### 1. Анализ возможных вариантов вычисления моментов высоких порядков помехи

На временном интервале  $0 \leq t \leq T$  наблюдается непрерывный случайный стационарный эргодический зашумленный нефильтрованный сигнал  $g(t)$ , состоящий из суммы случайной полезной составляющей  $x(t)$  и случайной помехи  $\varepsilon(t)$ , которые также являются стационарными эргодическими сигналами, и их невозможно выделить из  $g(t)$ . Случайный сигнал  $g(t)$  может подчиняться различным законам распределения, и для него можно вычислить выборочные оценки таких характеристик, как математическое ожидание  $m_g$ , дисперсия  $D_g$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma_g$ , корреляционная функция  $R_{gg}(\tau)$ , по формулам [16–18]:

$$m_g = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt;$$

$$D_g = \frac{1}{T} \int_0^T (g(t) - m_g)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{g}^2(t) dt;$$

$$\sigma_g = \sqrt{D_g};$$

$$R_{gg}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \dot{G}(t) \dot{G}(t + \tau) dt,$$

где  $\dot{g}(t) = g(t) - m_g$ ,  $\tau = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$  — временной сдвиг.

При этом полезная составляющая  $x(t)$  оценивает текущее состояние исследуемого процесса. Априори известно, что в системе мониторинга, контроля, диагностики, прогноза, управления, идентификации и т.д. суммарная помеха  $\varepsilon(t)$  содержит помеху  $\varepsilon_1(t)$ , которая возникла в результате внешнего воздействия (внешняя составляющая), и помеху  $\varepsilon_2(t)$ , которая появилась в результате возникновения повреждений, дефектов, неисправностей, неполадок и т.д. (дефектная составляющая) [1–15, 20, 21].

Помеха  $\varepsilon_1(t)$  измеряется соотношением сигнал/шум, и ее дисперсия, как правило, колеблется в пределах  $0 < D_{\varepsilon_1} \ll 1$ . При этом дисперсия суммарной помехи  $\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$  для буровых установок в большинстве случаев  $D_\varepsilon > 1$ . При появлении неисправности для нефильтрованного сигнала дисперсия суммарной помехи  $\varepsilon(t)$  колеблется в пределах  $1 < D_\varepsilon \leq 10$  [1–15].

В случае если сигнал фильтрован, значение суммарной дисперсии помехи может находиться в пределах  $0 < D_\varepsilon \ll 1$ , но подобные значения не являются информативными, и тогда дисперсию помехи нельзя использовать как носитель информации [1–15].

Кроме того, известно, что время корреляции шума  $\varepsilon(t)$  много меньше времени корреляции полезного сигнала  $x(t)$ .

Априори также известно, что помеха имеет нормальное распределение  $N(\varepsilon; m_\varepsilon, \sigma_\varepsilon)$  и нулевое среднее  $m_\varepsilon = 0$ . Так как стационарная случайная помеха  $\varepsilon(t)$  является эргодической, то ее математическое ожидание  $m_\varepsilon$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_\varepsilon$  имеют одно и то же значение для любой из случайных функций, входящих в совокупность. Поэтому функцию плотности нормального распределения  $N(\varepsilon; m_\varepsilon, \sigma_\varepsilon) = N(\varepsilon)$  помехи представим в виде

$$N(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon - m_\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}}.$$

Учитывая, что математическое ожидание помехи равно нулю, ее начальные и центральные моменты совпадают:  $v_{\varepsilon q} = \mu_{\varepsilon q}$ .

Следует отметить, что начальный момент первого порядка — математическое ожидание  $m_\varepsilon$ , центральный момент второго порядка — дисперсия  $D_\varepsilon$  помехи  $\varepsilon(t)$ , среднее квадратическое отклонение помехи:  $\sigma_\varepsilon = \sqrt{D_\varepsilon}$ .

Известно, что нечетные центральные моменты нормального распределения равны нулю [14, 15]. В то же время четные моменты высоких порядков помехи являются достаточно чувствительными диагностическими индикаторами определения динамики развития повреждения. Это связано с тем, что при изменении дисперсии (центрального момента второго порядка) помехи на незначительную величину по сравнению с исходным значением, которое больше единицы, моменты четвертого, шестого, восьмого и т.д. порядков изменяются на величины, которые в зависимости от порядка момента изменяются на более существенную величину. Тогда по порядку момента и его значению можно определить степень и динамику развития повреждения. Знание значений этих индикаторов дает возможность предотвратить переход буровых установок в неработоспособное или предельное состояние.

В теории вероятностей известно простое рекуррентное соотношение, выражающее моменты высших порядков через дисперсию  $D_\varepsilon = \mu_{\varepsilon 2}$  нормального распределения [18, 19]:

$$\mu_{\varepsilon 0} = 1; \mu_{\varepsilon q} = (q-1)\sigma_\varepsilon^2 \mu_{\varepsilon(q-2)}, \quad q = 2, 4, 6, \dots, \quad (1)$$

т. е.

$$\mu_{\varepsilon 4} = 3\sigma_\varepsilon^4, \quad \mu_{\varepsilon 6} = 15\sigma_\varepsilon^6, \quad \mu_{\varepsilon 8} = 105\sigma_\varepsilon^8, \dots \quad (2)$$

Таким образом, для вычисления четных моментов высших порядков нормально распределенной помехи следует сначала вычислить момент второго порядка — дисперсию помехи.

Однако в общем случае, когда помеха имеет произвольное распределение, для вычисления моментов высоких порядков необходимо знать функцию плотности распределения, так как в общем виде используется выражение

$$v_{\varepsilon q} = \mu_{\varepsilon q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^q f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

где  $f(\varepsilon)$  — функция плотности распределения.

Например, когда дефект приобретает явно выраженную форму, помеха не может быть описана нормальным распределением. В таких случаях помеха подчиняется логнормальному распределению.

Для нормального закона распределения выражение (3) представляется в виде

$$v_{\varepsilon q} = \mu_{\varepsilon q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^q N(\varepsilon) d\varepsilon = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^q \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\varepsilon - m_\varepsilon)^2}{2\sigma_\varepsilon^2}} d\varepsilon. \quad (4)$$

Так как в данной работе рассматривается только ранний период возникновения неисправности, то ниже предлагаются алгоритмы вычисления моментов высоких порядков нормально распределенной помехи  $\varepsilon(t)$ , которую невозможно отделить от зашумленного сигнала  $j(t)$ , а также показана возможность использования этих моментов для определения степени образовавшегося повреждения буровых установок и интенсивности его развития на начальной стадии.

## 2. Цифровые алгоритмы вычисления моментов высоких порядков помехи

Из выражений (1)–(4) очевидно, что для вычисления моментов высоких порядков необходимо сначала вычислить дисперсию  $D_\varepsilon$  помехи.

Пусть от датчика, размещенного в зоне действия влияющих на оборудование факторов, поступает зашумленный цифровой сигнал  $g(\Delta t)$ , состоящий из полезного сигнала  $x(\Delta t)$  и аддитивной помехи  $\varepsilon(\Delta t)$ . Сигнал  $g(\Delta t)$  дискретизирован шагом  $\Delta t$ , выбранным исходя из конечного времени корреляции  $\tau_{\text{end}}$  помехи. Тогда интервал времени  $T$  состоит из  $N$  малых интервалов  $\Delta t$ , т. е.  $T = N\Delta t$ , и сигнал  $x(t)$  мало

изменяется на протяжении интервала  $t + \Delta t$ . Придадим  $t$  и  $\tau$  дискретные значения, кратные  $\Delta t$ , т. е.  $t = \nu\Delta t$ ,  $\nu = 1, 2, \dots$ ;  $\tau = \mu\Delta t$ ,  $\mu = 0, 1, \dots$ , и введем обозначения  $R_{gg}(\mu\Delta t) = R_{gg}(\mu)$ ,  $R_{xx}(\mu\Delta t) = R_{xx}(\mu)$ ,  $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$ . Вычислим оценки корреляционных функций  $R_{gg}(\mu)$  зашумленного сигнала  $G(t)$  [16–19]:

$$R_{gg}(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{G}(i\Delta t) \overset{\circ}{G}((i + \mu)\Delta t), \quad (5)$$

где  $\overset{\circ}{g}(t) = g(t) - m_g$ ;  $m_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(i\Delta t)$  — математическое ожидание  $G(t)$ .

Учитывая, что полезный сигнал  $x(t)$  и помеха  $\varepsilon(t)$  некоррелированы:

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t) \varepsilon((i + \mu)\Delta t) &= 0; \\ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon(i\Delta t) x((i + \mu)\Delta t) &= 0, \end{aligned}$$

можно записать

$$R_{gg}(\mu) = R_{xx}(\mu) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu).$$

Таким образом, корреляционная функция  $R_{gg}(\mu)$  зашумленного сигнала  $g(t)$  состоит из суммы корреляционных функций  $R_{xx}(\mu)$  и  $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$  соответственно полезного сигнала  $x(t)$  и помехи  $\varepsilon(t)$ .

При этом на практике для инфранизкочастотных медленно протекающих технологических процессов, когда  $\tau = \Delta t$  значительно (многократно) мало по сравнению с временем наблюдения  $T$ , помеха  $\varepsilon(t)$  формируется из высокочастотных спектров вследствие возникновения таких повреждений, как трещины, поломки, пробоины, деформации и т.д., в результате износа, коррозии, нагарообразования, накипи и т.д. и имеет более высокий спектр, чем сама полезная составляющая  $x(t)$ . Значение же полезной составляющей за промежуток времени  $\Delta t$  не успевает измениться, и  $x(t + \Delta t)$  совпадает со значением  $x(t)$ , т. е.

$$x(t + \Delta t) = x(t). \quad (6)$$

Это равенство выполняется для случаев, когда  $T$  составляет, например, 10...20 ч, а  $\Delta t$  — секунды или минуты (в зависимости от специфики исследуемого процесса). В этом случае шаг дискретизации  $\Delta t$  выбирается исходя из конечного времени корреляции  $\tau_{\text{end}}$  помехи  $\varepsilon(t)$  с полезным сигналом.

Очевидно, что такое строгое равенство справедливо не для всех реальных процессов, а для таких, например, как нефтепереработка, нефтехимия и др. Для остальных технологических

процессов допустимо приближенное равенство. Тогда для указанных производственных объектов при выполнении условия (6) отношение  $\frac{R_{xx}(\Delta t)}{R_{xx}(0)}$  равно единице, т. е.  $R_{xx}(\Delta t) = R_{xx}(0)$ .

В то же время в силу того, что для случайного процесса  $g(t)$  шаг дискретизации  $\Delta t$  выбран исходя из конечного времени корреляции  $\tau_{\text{end}}$  помехи, то корреляционную функцию  $R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu)$  можно представить в виде [1–15]

$$R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) = \begin{cases} R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu) & \text{при } \mu = 0; \\ 0 & \text{при } \mu \geq \Delta t. \end{cases}$$

Поэтому, если по формуле (5) вычислить оценки корреляционной функции  $R_{gg}(\mu)$  зашумленного сигнала при  $\mu = 0$  и достаточно малом по сравнению со временем наблюдения  $T$  временном интервале  $\tau_{\text{end}} = \Delta t$  и найти их разницу, то получим

$$R_{gg}(0) - R_{gg}(\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(0).$$

Тогда оценка дисперсии  $D_{\varepsilon}^*$  помехи  $\varepsilon(t)$  зашумленного сигнала  $g(t)$  будет иметь вид

$$D_{\varepsilon} = R_{\varepsilon\varepsilon}(0) = R_{gg}(0) - R_{gg}(\Delta t)$$

или

$$\begin{aligned} D_{\varepsilon} = R_{\varepsilon\varepsilon}(0) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{g}(i\Delta t) \overset{\circ}{g}(i\Delta t) - \\ &- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{g}(i\Delta t) \overset{\circ}{g}((i + 1)\Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, дисперсию  $D_{\varepsilon}$  помехи  $\varepsilon(t)$  можно вычислить, определив разность оценок автокорреляционной функции  $R_{gg}(\mu)$  зашумленного сигнала при  $\mu = 0$  и достаточно малом  $\mu = \Delta t$  временном сдвиге, равном времени корреляции  $\tau_{\text{end}}$  помехи.

Однако в работах [1–15] была выведена также формула вычисления дисперсии помехи для случая, когда шаг дискретизации  $\Delta t$  сигнала  $g(t)$  выбран исходя из частотной полосы спектра помехи  $\varepsilon(t)$ , а не полезной составляющей  $x(t)$ , т. е.  $\Delta t = 1/(2f_{\varepsilon})$ , где  $f_{\varepsilon}$  — частота среза помехи (Гц):

$$D_{\varepsilon} = R_{gg}(0) - 2R_{gg}(\Delta t) + R_{gg}(2\Delta t)$$

или

$$\begin{aligned} D_{\varepsilon} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{G}(i\Delta t) \overset{\circ}{G}(i\Delta t) - \\ &- 2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{G}(i\Delta t) \overset{\circ}{G}((i + 1)\Delta t) + \\ &+ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{G}(i\Delta t) \overset{\circ}{G}((i + 2)\Delta t). \end{aligned} \quad (8)$$

Принимая во внимание рекуррентные соотношения (1), (2), получаем

$$\mu_{\varepsilon 4} = 3(D_{\varepsilon})^2, \mu_{\varepsilon 6} = 15(D_{\varepsilon})^3, \mu_{\varepsilon 8} = 105(D_{\varepsilon})^4, \dots \quad (9)$$

или

$$\mu_{\varepsilon q} = \begin{cases} (q-1)(R_{gg}(0) - R_{gg}(\Delta t))\mu_{\varepsilon(q-2)} \\ \text{для идеального случая;} \\ (q-1)(R_{gg}(0) - 2R_{gg}(\Delta t) + R_{gg}(2\Delta t))\mu_{\varepsilon(q-2)} \\ \text{для реального объекта.} \end{cases}$$

Кроме того, с использованием выражений (7), (8) моменты высоких порядков нормально распределенной помехи можно вычислить по формуле

$$\nu_{\varepsilon q} = \mu_{\varepsilon q} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^q \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\varepsilon}}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2D_{\varepsilon}}} d\varepsilon = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^q \frac{1}{\sqrt{2\pi(R_{gg}(0) - R_{gg}(\Delta t))}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2(R_{gg}(0) - R_{gg}(\Delta t))}} d\varepsilon \\ \text{для идеального случая;} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^q \frac{1}{\sqrt{2\pi(R_{gg}(0) - 2R_{gg}(\Delta t) + R_{gg}(2\Delta t))}} \times \\ \times e^{-\frac{\varepsilon^2}{2(R_{gg}(0) - 2R_{gg}(\Delta t) + R_{gg}(2\Delta t))}} d\varepsilon \\ \text{для реального объекта.} \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, показана возможность вычисления моментов высокого порядка помехи.

Ниже будет показано, что моменты высоких порядков могут быть использованы в системах мониторинга как диагностический признак определения интенсивности развития повреждений буровых установок.

### 3. Использование моментов высоких порядков как диагностического признака определения динамики развития повреждения буровых установок

Для определения степени развития повреждений буровой установки предлагается технология использования моментов высоких порядков как диагностического признака. Для этого следует для каждого информативного сигнала, поступающего от соответствующего датчика, составить матрицу, состоящую из оценок средних квадратических отклонений  $\sigma_{\varepsilon}$ , а также моментов высоких порядков помехи  $\nu_{\varepsilon 2} = D_{\varepsilon}$ ,  $\nu_{\varepsilon 4}$ ,  $\nu_{\varepsilon 6}$ ,  $\nu_{\varepsilon 8}$ , ..., полученных в различные моменты времени  $t_i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$

После этого следует провести анализ и сравнение вычисленных оценок для каждого сигнала в следующей последовательности.

Первый этап — определение наличия и степени зародившегося повреждения.

1. Если значение среднего квадратического отклонения помехи  $\sigma_{\varepsilon}$  находится в интервале  $0 < \sigma_{\varepsilon} < 1$ , то это означает, что оборудование не имеет повреждений в той части, от которой поступает информативный сигнал.

2. Если в какой-то момент времени  $t_i$  значение среднеквадратического отклонения больше единицы:  $\sigma_{\varepsilon_{ii}} > 1$ , то это свидетельствует о зародившемся повреждении. Причем, если  $\sigma_{\varepsilon_{ii}}$  сильно отличается от единицы, то повреждение существенное. В этом случае следует найти и устранить повреждение незамедлительно.

Если среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\varepsilon_{ii}}$  отличается от единицы незначительно, то это тоже является информативным признаком начала скрытого периода зарождения повреждения. Только в этом случае повреждение несущественное.

Затем для определения степени развития повреждения следует вычислить моменты второго  $\nu_{\varepsilon 2_{ii}}$  (дисперсию помехи  $D_{\varepsilon_{ii}}$ ), четвертого  $\nu_{\varepsilon 4_{ii}}$ , шестого  $\nu_{\varepsilon 6_{ii}}$ , восьмого  $\nu_{\varepsilon 8_{ii}}$  и т.д. порядков.

Второй этап — определение динамики развития повреждения.

Чтобы определить динамику развития повреждения, следует вычислить те же самые характеристики в следующий момент времени  $t_{i+1}$ .

1. Если оценки среднего квадратического отклонения помехи в момент времени  $t_i$  и в момент времени  $t_{i+1}$  не совпадают:  $\sigma_{\varepsilon_{ii}} \neq \sigma_{\varepsilon_{i(i+1)}}$ , то повреждение находится в состоянии развития. При этом интенсивность развития повреждения после обучения определяется степенью различия  $\sigma_{\varepsilon_{ii}}$  и  $\sigma_{\varepsilon_{i(i+1)}}$ . Если  $\sigma_{\varepsilon_{i(i+1)}} \gg \sigma_{\varepsilon_{ii}}$ , то повреждение находится в состоянии очень интенсивного развития.

Если оценки среднего квадратического отклонения помехи в момент времени  $t_i$  и в момент времени  $t_{i+1}$  совпадают:  $\sigma_{\varepsilon_{ii}} = \sigma_{\varepsilon_{i(i+1)}}$ , то повреждение существует, но не находится в состоянии развития.

Если же вместо строгого равенства выполняется приближенное равенство  $\sigma_{\varepsilon_{ii}} \approx \sigma_{\varepsilon_{i(i+1)}}$ , то возможно, что повреждение находится в состоянии развития. Тогда для уяснения ситуации следует сравнить моменты второго порядка — дисперсии.

2. Если оценки дисперсии помехи в момент времени  $t_i$  и в момент времени  $t_{i+1}$  не совпадают:  $D_{\varepsilon_{ii}} \neq D_{\varepsilon_{i(i+1)}}$ , то повреждение находится

в состоянии развития. Интенсивность развития определяется после соответствующего обучения. Если  $D_{\varepsilon_{t(i+1)}} > D_{\varepsilon_{t_i}}$  или  $D_{\varepsilon_{t(i+1)}} \gg D_{\varepsilon_{t_i}}$ , то повреждение находится в состоянии интенсивного развития.

Если оценки дисперсии помехи в момент времени  $t_i$  и в момент времени  $t_{i+1}$  совпадают:  $D_{\varepsilon_{t_i}} = D_{\varepsilon_{t(i+1)}}$ , то повреждение имеется, но не находится в состоянии развития.

Если же вместо строгого равенства выполняется приближенное равенство  $D_{\varepsilon_{t_i}} \approx D_{\varepsilon_{t(i+1)}}$ , то, возможно, повреждение находится в состоянии развития. Тогда следует сравнить моменты четвертого порядка.

3. Если оценки моментов четвертого порядка помехи в момент времени  $t_i$  и в момент времени  $t_{i+1}$  не совпадают:  $v_{\varepsilon_{4t_i}} \neq v_{\varepsilon_{4t(i+1)}}$ , то повреждение находится в состоянии развития, интенсивность которого определяется после соответствующего обучения.

Если оценки моментов четвертого порядка помехи в момент времени  $t_i$  и в момент времени  $t_{i+1}$  совпадают:  $v_{\varepsilon_{4t_i}} = v_{\varepsilon_{4t(i+1)}}$ , то в техническом состоянии оборудования не произошло никаких изменений.

Если же вместо строгого равенства выполняется приближенное равенство  $v_{\varepsilon_{4t_i}} \approx v_{\varepsilon_{4t(i+1)}}$ , то, возможно, имеются изменения. Тогда следует сравнить моменты шестого порядка.

4. Аналогично сравниваются моменты шестого, восьмого и т.д. порядков помехи.

5. В зависимости от выполнения вышеуказанных условий (моменты совпадают, не совпадают, приближенно равны) делаются соответствующие выводы: повреждение развивается "очень быстро", "достаточно быстро", "быстро", "недостаточно быстро", "медленно", "очень медленно".

Вычисления, описанные в первом и втором этапах, следует выполнить для всех сигналов, которые поступают от датчиков. Затем следует провести обучение и установить соответствие между значениями моментов высокого порядка и видом, степенью и интенсивностью развития этого повреждения. После этого система мониторинга, анализируя результаты первого и второго этапов оценки состояния оборудования, может выдавать сообщения типа: 1 — повреждение незначительное и возрастает неинтенсивно и неравномерно; 2 — повреждение осязаемое и развивается с небольшой равномерной интенсивностью; 3 — повреждение сильное и характеризуется интенсивным развитием.

#### 4. Система noise-контроля начала и динамики развития аварий на буровых установках

В настоящее время на буровых установках управление процессом бурения осуществляется бурильщиком с помощью системы контроля установки (СКУ). Буровому мастеру с помощью этой системы удается своевременно получить всевозможную информацию и оперативно управлять процессом бурения. Однако СКУ в начальном скрытом периоде возникновения аварийного состояния не обеспечивает бурильщика адекватной информацией, и этот момент устанавливается буровым мастером интуитивно. Таким образом, вероятность возникновения аварии в определенной степени зависит от его квалификации. Поэтому для исключения возможных ошибок необходимо обеспечить мастера-бурильщика инструментарием, позволяющим облегчить его интуитивную деятельность [1].

В работе для этой цели создан экспериментальный вариант подсистемы Noise-контроля начала и динамики развития неисправностей. Кроме того, для проведения полунатурных экспериментов также построен действующий макет установки бурения. Noise-система состоит из трех вибрационных датчиков  $DV_1$ ,  $DV_2$ ,  $DV_3$  типа Accutech AM20, приемной антенны типа BeanGateway controller и компьютера типа Getac A770. Датчики  $DV_1$ ,  $DV_2$ ,  $DV_3$  установлены (прикреплены) соответственно на столе ротора, наверху буровой вышки и середине каркаса станка. Они осуществляют измерение и передачу вибрационных сигналов  $gv_1(t)$ ,  $gv_2(t)$ ,  $gv_3(t)$  по радиоканалу на расстоянии до 650 м. Антенна BeanGateway controller принимает эти сигналы и осуществляет их ввод на компьютер.

В процессе бурения от возникновения крутильной, осевой и боковой вибраций формируется суммарный вибрационный процесс, который с помощью датчиков  $DV_1$ ,  $DV_2$ ,  $DV_3$  преобразуется в зашумленные вибрационные сигналы  $gv_1(t)$ ,  $gv_2(t)$ ,  $gv_3(t)$ , которые по радиоканалу передаются в компьютер, где в программных модулях  $M_1, \dots, M_5$  на основе алгоритмов (7)–(10) вычисляются комбинации информативных признаков, состоящих из оценок моментов высоких порядков  $\sigma_\varepsilon, v_{\varepsilon 2} = D_\varepsilon, v_{\varepsilon 4}, v_{\varepsilon 6}, v_{\varepsilon 8}$ , которые отражают техническое состояние бурильной установки и динамику его изменения (рис. 1). Затем система мониторинга, анализируя результаты вычислений оценок моментов высоких порядков, выдает сообщения о степени возникшего повреждения и динамике его развития.

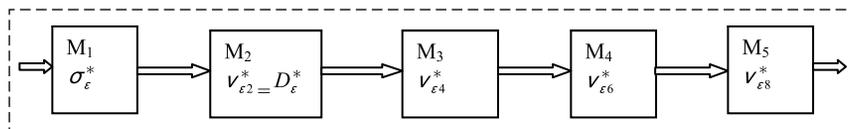


Рис. 1. Этапы вычисления моментов  
Fig. 1. Stages of the calculation of the moments

Эксперименты показали, что в процессе бурения в периоды времени, когда не имеет место аварийная ситуация, если даже оценки моментов высоких порядков суммарных зашумленных вибросигналов  $gv_1(t)$ ,  $gv_2(t)$ ,  $gv_3(t)$  меняются в большом диапазоне, их noise-моменты высоких порядков не превышают заданное значение. Однако с момента, когда в процессе бурения возникают неисправности, эти оценки моментов помехи становятся больше заданного порогового уровня, и по мере развития дефекта их значения также увеличиваются. Если неблагоприятные процессы стабилизируются, изменение во времени этих оценок прекращается, причем в зависимости от степени и интенсивности стабилизации технического состояния буровой установки очередно прекращается изменение оценок моментов, начиная от самого высокого до самого низкого или наоборот. Эта специфика оценок noise-моментов высоких порядков вибрационных сигналов позволяет определить начало и контролировать динамику развития скрытого периода аварийного состояния процесса бурения. Представление данной информации буровому мастеру дает возможность принимать оптимальное решение путем выбора наиболее выгодного времени для принятия необходимых мер предотвращения аварий.

Как показали результаты многочисленных экспериментов, чем выше порядок момента, значение которого превышает экспериментально установленный уровень, тем меньшей опасности подвергается буровая установка. Если динамика изменения этой оценки момента мед-

ленная или умеренная, то мастер может, "не впадая в панику", найти и устранить возникший дефект. Если же порядок момента низкий, а его значение значительно превышает пороговую величину и интенсивно увеличивается, то это

свидетельствует о высокой степени динамики развития аварийного состояния. Тогда буровой мастер не имеет права ждать появления информации об аварийном состоянии процесса на табло СКУ и должен незамедлительно принимать экстренные меры для предотвращения аварийной ситуации или же вызвать аварийную службу.

Когда же увеличение оценок noise-моментов высоких порядков прекращается, он может продолжать процесс бурения в обычном режиме.

На рис. 2 и в табл. 1—4 для одного параметра представлены результаты многочисленных экспериментов, отражающих следующие случаи:

1) повреждение незначительное и возрастает неинтенсивно и неравномерно; в этом случае за период времени  $\Delta T = t_{i+1} - t_i$  значительное изменение ощущается только для оценки момента восьмого порядка, который увеличивается с 113,7 до 123,024; буровой мастер может спокойно заблаговременно планировать комплекс мер для ее устранения (табл. 1);

2) повреждение неощутимое и развивается с небольшой интенсивностью; в этом случае за период времени  $\Delta T$  значительное изменение ощущается для оценки момента начиная с шестого порядка, который увеличивается с 15,923 до 34,696; буровой мастер может приступить к устранению причин возникновения аварий, не дожидаясь соответствующей информации от СКУ (табл. 2);

3) повреждение ощутимое и развивается ускоренно; в этом случае за период времени  $\Delta T$  значительное изменение ощущается уже для оценки момента начиная с четвертого порядка,

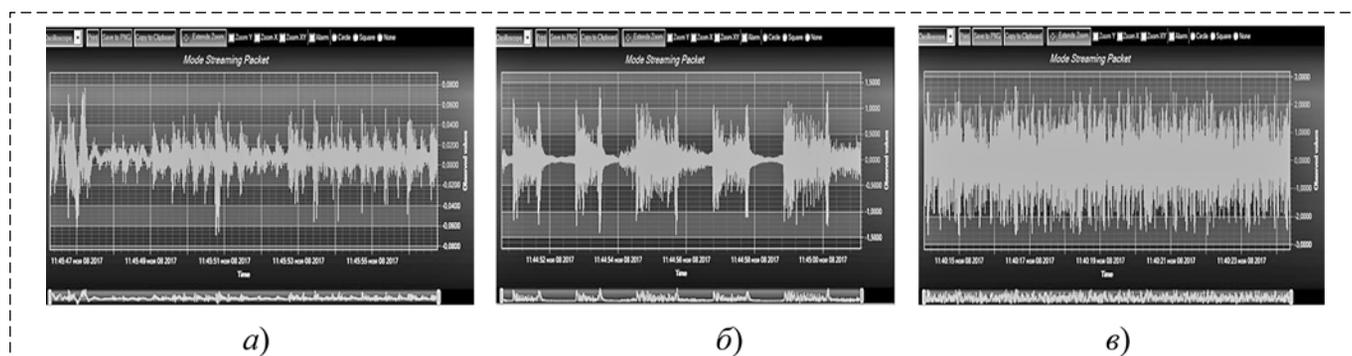


Рис. 2. Этапы развития неисправности  
Fig. 2. Stages of malfunction development

который увеличивается с 3,122 до 15,188; буровой мастер должен принимать меры незамедлительно, так как ожидание и подтверждение достоверности этой информации СКУ могут оказаться запоздалыми, что может быть причиной аварии (табл. 3);

4) повреждение сильное и характеризуется интенсивным развитием; в этом случае за период времени  $\Delta T$  момент второго порядка увеличился с 1,02 до 7,29; буровой мастер может не справиться с устранением возникшей неисправности самостоятельно и должен вызвать аварийную службу на помощь (табл. 4).

Таблица 1  
Table 1

**Результаты экспериментов для случая, когда повреждение незначительное и возрастает неинтенсивно и неравномерно**

*Results of the experiment for the case when damage is insignificant and increases slowly and unevenly*

$\Delta T$ , мин	$\sigma_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 2} = D_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 4}$	$v_{\varepsilon 6}$	$v_{\varepsilon 8}$
1	1,01	1,02	3,122	15,923	113,7
5	1,02	1,04	3,247	16,892	123,024

Таблица 2  
Table 2

**Результаты экспериментов для случая, когда повреждение неощутимое и развивается с небольшой интенсивностью**

*Results of the experiment for the case when damage is imperceptible and develops with low intensity*

$\Delta T$ , мин	$\sigma_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 2} = D_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 4}$	$v_{\varepsilon 6}$	$v_{\varepsilon 8}$
1	1,01	1,02	3,122	15,923	113,7
5	1,15	1,323	5,247	34,696	321,197

Таблица 3  
Table 3

**Результаты экспериментов для случая, когда повреждение оощутимое и развивается ускоренно**

*Results of the experiment for the case when damage is perceptible and develops rapidly*

$\Delta T$ , мин	$\sigma_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 2} = D_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 4}$	$v_{\varepsilon 6}$	$v_{\varepsilon 8}$
1	1,01	1,02	3,122	15,923	113,7
5	1,5	2,25	15,188	170,859	2691,035

Таблица 4  
Table 4

**Результаты экспериментов для случая, когда повреждение сильное и характеризуется интенсивным развитием**

*Results of the experiment for the case when damage is severe and characterized by intensive development*

$\Delta T$ , мин	$\sigma_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 2} = D_\varepsilon$	$v_{\varepsilon 4}$	$v_{\varepsilon 6}$	$v_{\varepsilon 8}$
1	1,01	1,02	3,122	15,923	113,7
5	2,7	7,29	159,432	5811,307	296551,013

Отметим, что в начале аварийной ситуации на экран монитора noise-системы передается информация об оценках моментов высоких порядков помех всех параметров. Тогда по комбинациям оценок этих характеристик для сигналов, полученных от всех трех датчиков DV1, DV2, DV3, система контроля выдает соответствующее сообщение о техническом состоянии буровой установки.

В системе предусмотрено, что буровой мастер после появления первой строки, т.е. после получения предупредительной информации, сам определяет промежуток времени  $\Delta T$ , который он считает достаточным для контролирования динамики развития аварийного процесса. При этом он имеет возможность последовательно построчно получить информацию с шагом  $\Delta T = 1$ ,  $\Delta T = 5$  мин и т.д. После установки целесообразного интервала времени  $\Delta T$  система представляет ему очередную строку во всех четырех таблицах с указанием динамики увеличения оценок по сравнению с предыдущей строкой. Таким образом, мастер с начала аварийного процесса получает информацию как о начале скрытого периода аварийного процесса, так и о динамике ее развития.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что моменты высоких порядков помехи позволяют не только определить наличие и степень зародившегося повреждения на ранней стадии, но и проследить интенсивность развития повреждения в скрытом периоде. Это достигается за счет вычисления значений оценок моментов высоких порядков помех, полученных в различные моменты времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$ . Предложенные теоретические положения были применены для определения скрытого раннего периода зарождения неисправностей буровой установки. В работе для этой цели создан экспериментальный вариант подсистемы Noise-контроля начала и динамики развития неисправностей, а также для проведения полунатурных экспериментов построен действующий макет установки бурения. Предлагаемая подсистема Noise-контроля начала скрытого периода аварийного состояния может значительно облегчить работу бурового мастера при возникновении сомнительных ситуаций, когда информация, получаемая от традиционных систем контроля, недостаточна для принятия адекватных мер заблаговременного предотвращения аварии [1–15, 22].

## Список литературы

1. **Telman Aliev.** Noise Control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents. Springer, 2019, 201 p. DOI 10.1007/978-3-030-12512-7.
2. **Aliev T. A.** Digital Noise Monitoring of Defect Origin, Springer, New York, 2007, p. 223. DOI10.1007/978-0-387-71754-8.
3. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T.** Density Function of Noise Distribution as an Indicator for Identifying the Degree of Fault Growth in Sucker Rod Pumping Unit (SRPU) // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. Vol. 49. No. 4. P. 1—11. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i4.10.
4. **Aliev T. A., Nusratov O. G., Guluev G. A., Rzaev As. G., Pashaev F. G., Rezvan M. G.** Position-Binary Technology for Processing the Signals of a Load for Identification of the Technical State of Deep-Well Sucker-Rod Pumps // *Measurement Techniques*. Vol. 61. No. 9. 2018. P. 885—890. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1519-x>.
5. **Алиев Т. А., Мусаева Н. Ф., Сулейманова М. Т., Газизаде Б. И.** Чувствительные алгоритмы выявления степени развития неисправности штанговой глубинной насосной установки // *Мехатроника, автоматизация, управление*. Т. 18. № 2. 2017. С. 94—102. DOI: 10.17587/mau.18.91-102.
6. **Aliev T. A., Musaeva N. F.** An algorithm for eliminating microerrors of noise in the solution of statistical dynamics problems // *Automation and remote control*. 1998. Vol. 59 (2). N. 5. P. 679—688.
7. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I.** Analytic representation of the density function of normal distribution of noise. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2015. Vol. 47(8). N. 4. P. 24—40. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i8.30.
8. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I.** Technology for calculating the parameters of the density function of normal distribution of the useful component in a noisy process // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48. N. 4. P. 35—55. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i4.50.
9. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I.** Algorithms of building a model of the noisy process by correction of the law of its distribution // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. Vol. 49. N. 9. P. 61—75. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i9.50.
10. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T.** Algorithms for Indicating the Beginning of Accidents Based on the Estimate of the Density Distribution Function of the Noise of Technological Parameters // *Automatic Control and Computer Science*. 2018. Vol. 52, Iss. 3. P. 231—242. DOI: 10.3103/S0146411618030021.
11. **Musaeva N. F.** Robust method of estimation with "contaminated" coarse errors // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2003. Vol. 37. N. 6. P. 50—63. <https://elibrary.ru/contents.asp?id=33405883>.
12. **Aliev T. A., Musaeva N. F.** Statistical identification with error balancing // *Journal of computer and systems sciences international*. 1996. Vol. 34, Iss. 5. P. 119—124.
13. **Aliev T. A., Musaeva N. F.** Algorithms for improving adequacy of statistical identification // *Journal of computer and systems sciences International*. 1997. Vol. 36, Iss. 3. P. 363—369. <https://www.tib.eu/en/search/id/olc%3A1518633188/Algorithms-for-Improving-Adequacy-of-Statistical>.
14. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I.** Algorithm of application of high-order moments of the useful component as a diagnostic indicator of changes in the technical state // *Journal of Automation and Information Sciences*. Vol. 50. No. 11. 2018. P. 29—43. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i11.30>.
15. **Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I.** Algorithms for calculating high-order moments of the noise of noisy signals // *Journal of Automation and Information Sciences*. Vol. 50. No. 6. 2018. P. 1—13. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v50.i6.10>.
16. **Техническая кибернетика. Книга 2 /** Под ред. Солодовникова В. В. М.: Машиностроение, 1967. 682 с.
17. **Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. 5-е изд. М.: КНОРУС, 2013. 448 с.
18. **Пугачев В. С.** Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд., М.: Физматлит, 2002. 496 с.
19. **Иванова В. М., Калинина В. Н., Нешумова Л. А., Решетникова И. О.** Математическая статистика. М.: Высшая Школа, 1975. 398 с.
20. **Bila G. D.** Identification of a Nonparametric Signal Under Strongly Dependent Random Noise // *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, Iss. 1. P. 160—172.
21. **Stoikova L. S.** Greatest Lower Bound of System Failure Probability on a Special Time Interval Under Incomplete Information About the Distribution Function of the Time to Failure of the System // *Cybernetics and Systems Analysis*. 2017. Vol. 53, Iss. 2. P. 217—224.
22. **Abbasov A. M., Mamedova M. H., Orujov G. H., Aliyev H. B.** Synthesis of the methods of subjective knowledge representations in problems of fuzzy pattern recognition // *Mechatronics*. 2001. N. 11. P. 439—449.

## Technologies for Monitoring the Dynamics of Damage Development in Drilling Rigs Using High-Order Moments of the Noise

**T. A. Aliev**<sup>1,2</sup>, [telmancyber@gmail.com](mailto:telmancyber@gmail.com), **N. F. Musaeva**<sup>2</sup>, [musanaila@gmail.com](mailto:musanaila@gmail.com),  
**B. I. Gazizade**<sup>1</sup>, [behruz.qazizade@gmail.com](mailto:behruz.qazizade@gmail.com),

<sup>1</sup>Institute of Control Systems (Azerbaijan National Academy of Sciences), AZ1141, Baku, Republic of Azerbaijan

<sup>2</sup>Azerbaijan University of Architecture and Construction, AZ1073, Baku, Republic of Azerbaijan

*Corresponding author: Musaeva Naila F.*, Doctor of Engineering,  
Azerbaijan University of Architecture and Construction, AZ1073, Baku, Republic of Azerbaijan,  
e-mail: [musanaila@gmail.com](mailto:musanaila@gmail.com)

Accepted on September 20, 2019

### Abstract

The paper deals with the development of algorithms for calculating the high-order moments of the noise of noisy signals and their use in the analysis of the technical condition of industrial facilities. It is shown that for monitoring and controlling the onset of an emergency at oil production facilities, random vibration signals are used, which, in addition to the noise caused by external factors at the time of the initiation of the malfunction, also contain additional noise. The characteristics of this noise contain certain information about the technical condition of the drilling rig. Earlier, algorithms were developed for calculating the variance, standard deviation, and density distribution function of the noise that cannot be separated from the noisy signal. In this paper, it is shown that high-order moments of the noise can be used as a diagnostic indicator

for determining the presence and degree of damage development in drilling rigs during the latent period of damage initiation. Possible options for calculating the high-order moments of the noise are analyzed. Recursive algorithms are developed for expressing high-order moments of a normally distributed noise through its variance. The possibility of calculating the high-order moments of the noise through the distribution density functions is also shown. A matrix consisting of estimates of the high-order moments of the noise calculated at different instants of time is built. It is shown that at the first stage, it is possible to determine the presence and degree of the damage based on the values of the matrix elements. At the second stage, the intensity of damage development is determined by comparing the values of the noise characteristics at different instants of time. Calculations are performed for all signals coming from the sensors. Training is carried out and, the correspondence is established between the values of the high-order moments and degrees and intensity of damage development. The possibility of using the proposed algorithms and technologies in the system of noise control of the beginning and development dynamics of accidents at drilling rigs is shown. It is noted that even if the estimates of the high-order moments of the sum noisy vibration signals change within a wide range during drilling, their high-order noise moments do not exceed a predetermined value in the absence of a malfunction. In the event of a malfunction, the estimates of the high-order moments of the noise exceed the predetermined threshold level and, as the defect develops, their values also change. If adverse processes are stabilized, the variation of these estimates stops as well. Moreover, depending on the degree and intensity of stabilization of the technical condition of the drilling rig, the change in the estimates of the moments, starting from the highest to the lowest or vice versa, stops one by one. This specific feature of estimates of high-order noise moments of vibration signals allows us to identify the beginning and to control the development dynamics of the latent period of an emergency state of the drilling process.

**Keywords:** noisy signal, noise, noise characteristics, high-order moments of noise, drilling rig, monitoring system

**Acknowledgements:** The study has been carried out with the financial support of the Science Fund of the State Oil Company of the Azerbaijan Republic within the framework of the research project "Development of a system for adequate identification and early diagnostics on the basis of the position-binary technology".

For citation:

Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I. Technologies for Monitoring the Dynamics of Damage Development in Drilling Rigs Using High-Order Moments of the Noise, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 4, pp. 213–223.

DOI: 10.17587/mau.21.213-223

## References

1. Aliev T. Noise Control of the Beginning and Development Dynamics of Accidents, Springer, 2019, 201 p.
2. Aliev T. A. Digital Noise Monitoring of Defect Origin, Springer, New York, 2007, 223 p.
3. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T. Density Function of Noise Distribution as an Indicator for Identifying the Degree of Fault Growth in Sucker Rod Pumping Unit (SRPU), *Journal of Automation and Information Sciences*, 2017, vol. 49, no. 4, pp. 1–11.
4. Aliev T. A., Nusratov O. G., Guluev G. A., Rzaev As. G., Pashaev F. G., Rezvan M. G. Position-Binary Technology for Processing the Signals of a Load for Identification of the Technical State of Deep-Well Sucker-Rod Pumps, *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 885–890.
5. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I. Sensitive algorithms for detecting the degree of development of a malfunction of a sucker rod pumping unit, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, Moscow, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 94–102 (in Russian).
6. Aliev T. A., Musaeva N. F. An algorithm for eliminating microerrors of noise in the solution of statistical dynamics problems, *Automation and Remote Control*, 1998, vol. 59 (2), no. 5, pp. 679–688.
7. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I. Analytic representation of the density function of normal distribution of noise, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015, vol. 47 (8), no. 4, pp. 24–40.
8. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T., Gazizade B. I. Technology for calculating the parameters of the density function of normal distribution of the useful component in a noisy process, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, vol. 48, no. 4, pp. 35–55.
9. Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I. Algorithms of building a model of the noisy process by correction of the law of its distribution, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2017, vol. 49, no. 9, pp. 61–75.
10. Aliev T. A., Musaeva N. F., Suleymanova M. T. Algorithms for Indicating the Beginning of Accidents Based on the Estimate of the Density Distribution Function of the Noise of Technological Parameters, *Automatic Control and Computer Science*, 2018, vol. 52, no. 3, pp. 231–242.
11. Musaeva N. F. Robust method of estimation with "contaminated" coarse errors, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2003, vol. 37, no. 6, pp. 50–63.
12. Aliev T. A., Musaeva N. F. Statistical identification with error balancing, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1996, vol. 34 no. 5, pp. 119–124.
13. Aliev T. A., Musaeva N. F. Algorithms for improving adequacy of statistical identification, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1997, vol. 36, no. 3, pp. 363–369.
14. Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I. Algorithm of application of high-order moments of the useful component as a diagnostic indicator of changes in the technical state, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2018, vol. 50, no. 11, pp. 29–43.
15. Aliev T. A., Musaeva N. F., Gazizade B. I. Algorithms for calculating high-order moments of the noise of noisy signals, *Journal of Automation and Information Sciences*, Vol. 50, no. 6, 2018, p. 1–13.
16. **Technical Cybernetics**. Book 2. Edited by Solodovnikov V. V., Moscow, Mashinostroenie, 1967, 682 p. (in Russian).
17. Ventsel Y. S., Ovcharov L. A. The Theory of Random Processes and Its Engineering Applications, 5th ed., Moscow, KNORUS, 2013, 448 p. (in Russian).
18. Pugachev V. S. Theory of Probability and Mathematical Statistics. 2nd ed., Moscow, Fizmatlit, 2002, 496 p. (in Russian).
19. Ivanova V. M., Kalinina V. N., Neshumova L. A., Reshetnikova I. O. Mathematical Statistics, Moscow, Vysshaya Shkola, 1975, 398 p. (in Russian).
20. Bila G. D. Identification of a Nonparametric Signal Under Strongly Dependent Random Noise, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 160–172.
21. Stoikova L. S. Greatest Lower Bound of System Failure Probability on a Special Time Interval Under Incomplete Information About the Distribution Function of the Time to Failure of the System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 217–224.
22. Abbasov A. M., Mamedova M. H., Orujov G. H., Aliyev H. B. Synthesis of the methods of subjective knowledge representations in problems of fuzzy pattern recognition, *Mechatronics*, 2001, no. 11, pp. 439–449.