

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЛУБИННОГО БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫБРОСОВ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОСЕВОЙ НАГРУЗКИ

Ишемгузин И.Е., Имаева Э.Ш. (УГНТУ)

При бурении на нефть и газ, проводке горизонтальных стволов для повышения нефтеотдачи и обеспечения экологической безопасности скважин очень важны оперативный контроль за процессом бурения и использование безотказного глубинного оборудования. Случайные колебания, возникающие в процессе бурения, служат одним из источников информации о техническом состоянии бурового и нефтепромыслового оборудования. Использование вероятностных методов при диагностировании, включая теорию случайных процессов, спектрально-корреляционный анализ, теорию выбросов за установленный уровень при случайных колебаниях осевой нагрузки позволит снизить вероятность отказа глубинного бурового оборудования, увеличить его технический ресурс, определить параметры виброзащитных устройств для повышения показателей бурения.

Реализация случайного процесса в виде осевой нагрузки на долото может несколько раз пересекать некоторый фиксированный уровень, что принято характеризовать как выбросы случайного процесса за данный уровень. Через совместную плотность распределения процесса $x(t)$ и его производной $\dot{x}(t)$:

$$w(u, v) = m\{\delta[u - x(t)]\delta[v - \dot{x}(t)]\}, \quad (1)$$

среднее число выбросов или среднее число пересечений уровня $x = \alpha$ за единицу времени определяется следующим образом [2]:

$$v(\alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} v w(\alpha, v) dv. \quad (2)$$

Случайный процесс может быть охарактеризован параметрами, которые являются предметом исследования теории случайных выбросов [3] и наиболее широко используются при решении практических задач (рис. 1):

- вероятностные характеристики числа пересечений заданного уровня x_1 случайным процессом $x(t)$ с положительной или отрицательной производной на интервале T (t_i – точки пересечения уровня);

- вероятностные характеристики длительности выбросов случайного процесса над заданным уровнем x_1 интервалов между выбросами $\theta(x_1)$ и интервалов между одноименными пересечениями уровня $\psi(x_1)$;

- вероятностные характеристики времени $\zeta(x_1)$ первого достижения заданной границы x_1 с определенным знаком производной;

- вероятностные характеристики времени $\rho(x_1, x_2)$ первого достижения случайным процессом, находящимся в фиксированный момент времени t_f в пределах заданной области G его значений, одной из границ (x_1 или x_2) этой

области;

- вероятностные характеристики длительности интервалов между экстремумами случайного процесса, в частности, интервалов \mathcal{E}_+ между его максимумами, интервалов \mathcal{E}_- между его минимумами, интервалов \mathcal{E}_{+-} между максимумом и соседним минимумом и интервалов \mathcal{E}_{-+} между минимумом и соседним максимумом;

- вероятностные характеристики времени θ_{\max} и θ_{\min} первого достижения случайным процессом $x(t)$ своего экстремального значения (t_{mx1} или t_{mn1});

- вероятностные характеристики числа максимумов и минимумов случайного процесса в единицу времени и мгновенных значений экстремумов случайного процесса (t_{mxi} и t_{mni});

- вероятностные характеристики мгновенных значений максимумов случайного процесса в реализациях конечной длительности T (t_{mx} и t_{mn}).

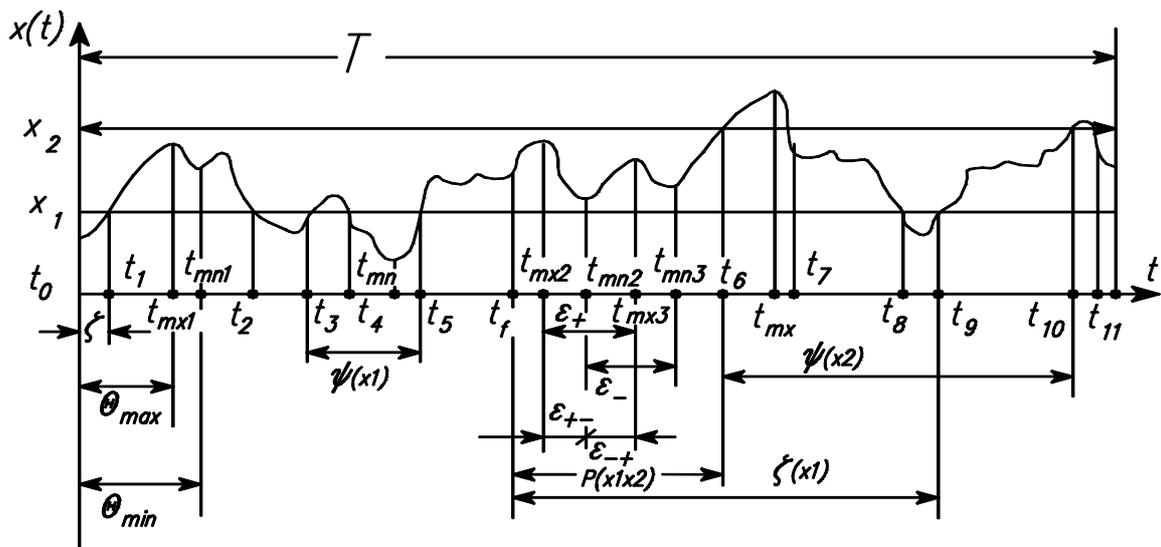


Рисунок 1 – Характеристики выбросов случайных процессов

Основными характеристиками выбросов являются [1] (рис. 2):

- относительная длительность $\bar{\delta}$ нахождения параметра $x(t)$ вне зоны $\pm \Delta \bar{x}$ в течение времени T , т.е. $\bar{\delta} = \bar{t}_\Delta / T$, где \bar{t}_Δ – среднее время пребывания параметра агрегата вне полосы $|2\Delta \bar{x}|$;

- относительная длительность \bar{p} нахождения функции $x(t)$ в интервале $|2\Delta \bar{x}|$;

- среднее значение общего числа выбросов $\bar{n}_\Delta = \bar{n}_\Delta / T$ в единицу времени (\bar{n}_Δ – среднее число превышений зоны допуска $\pm \Delta \bar{x}$ за период T);

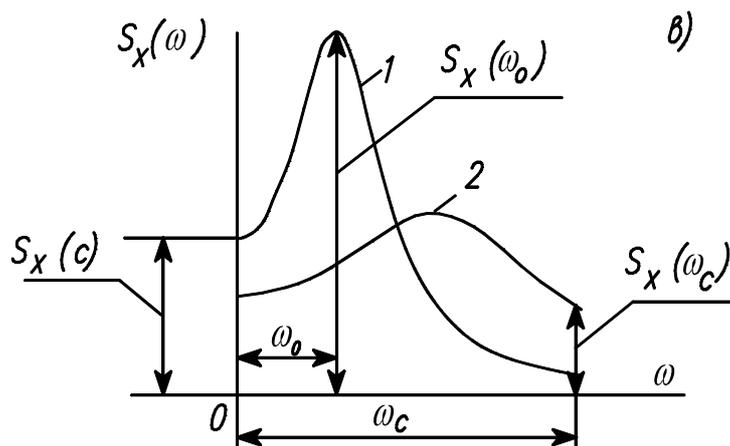
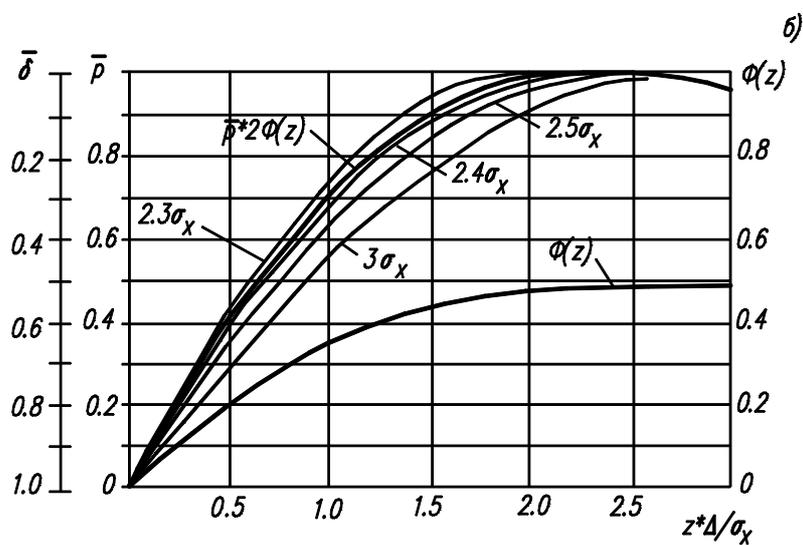
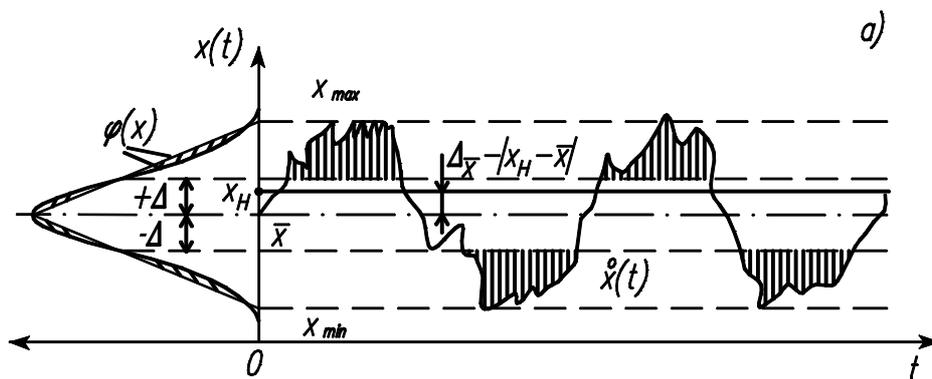


Рисунок 2 – Схема (а) процесса $x(t)$, зависимость его оценок от параметра z (б) и дифференциация энергетических спектров (в) (1 – узкополосный спектр, 2 – широкополосный спектр).

- средняя продолжительность $\bar{\tau}$ одного выброса, или среднее время пребывания случайной функции вне интервала $|2\Delta\bar{x}|$ за один выброс;
- средняя площадь \bar{S} , ограниченная полосой $|2\Delta\bar{x}|$ и реализацией.

Для последующего использования числа выбросов в качестве диагностического параметра предлагается применить аппроксимацию статистических характеристик случайных процессов и оценку корреляционных функций и спектральных плотностей.

В случае стационарности и эргодичности случайного процесса дискретный аналог корреляционной функции может быть представлен в виде

$$K_{xm} = \frac{1}{N-m} \left(\frac{x_0 x_m + x_{N-m} x_N}{2} + \sum_{n=1}^{N-m-1} x_n x_{n+m} \right), \quad (3)$$

где N – общее число отсчетов значений случайного процесса на интервале наблюдения T ;

m – текущий номер отсчета значений корреляционной функции;

n – текущий номер отсчета значений случайного процесса.

Рассчитанные таким образом значения аппроксимируются теоретической зависимостью. Для технологических процессов при бурении наилучшим вариантом является использование функции вида

$$K_x(\tau) = D_x \exp(-\alpha|\tau|) \cos(\beta\tau), \quad (4)$$

где D_x – дисперсия процесса;

α – параметр, характеризующий степень затухания кривой $K_x(\tau)$;

β – средняя частота колебаний функции $K_x(\tau)$.

Параметры α и β подбираются по методу наименьших квадратов. При этом минимизируется функционал вида

$$\Phi(\alpha, \beta) = \frac{(K_{xM} - K_{xM}(\alpha, \beta))^2}{2} + \sum_{m=1}^{M-1} (K_{xm} - K_{xm}(\alpha, \beta))^2, \quad (5)$$

где M – максимальное значение m ($M \ll N$).

Минимизация функционала (5) может быть осуществлена различными численными методами. Так как число значений K_{xm} относительно невелико ($M \ll N$), то наиболее простым методом поиска минимума функционала (5) является метод перебора: во множестве допустимых значений α и β вычисляются значения функционала и сравниваются между собой, точка (α^*, β^*) , для которой функционал минимален, дает искомое уравнение регрессии, спектральная плотность вычисляется по найденным значениям корреляционной функции. При небольшой выборке этот метод является

единственно возможным.

Другой подход к оценке спектральной плотности основан на непосредственном ее определении по дискретным значениям случайного процесса: весь интервал наблюдений разбивается на ряд равных участков меньшей длины и определяется энергетический спектр каждого участка в отдельности; усреднение этих спектров по всем участкам дает оценку спектральной плотности случайного процесса. Аппроксимировать полученную совокупность значений спектральной плотности можно теоретической зависимостью

$$S_x(\omega) = D_x \left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + (\beta + \omega)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\beta - \omega)^2} \right). \quad (6)$$

Параметры α и β также подбираются с использованием метода наименьших квадратов. Результаты анализа показали, что экстремумы функционалов (минимумы) для зависимостей (4) и (6) не являются четко выраженными. Вместе с тем для одного и того же процесса полученные значения параметров для корреляционной функции и спектральной плотности в ряде случаев отличаются друг от друга, что не позволяет по аппроксимации одной зависимости моделировать случайный процесс. Данные затруднения преодолеваются путем совместной аппроксимации корреляционной функции и спектральной плотности исследуемого случайного процесса.

Теорию выбросов можно применить и при решении вопросов виброзащиты глубинного оборудования, т.е. оценить влияние собственной частоты и параметров демпфирования при функционировании забойного оборудования. Используем метод оптимизации виброзащиты по надежности, т.е. минимизируем вероятность того, что за время эксплуатации объекта его параметры хотя бы раз выйдут за допустимые пределы. Для высоконадежных систем имеет место оценка функции надежности

$$P(t) \geq 1 - \int_0^t v(z, \tau) d\tau, \quad (7)$$

где $v(z, \tau)$ – математическое ожидание числа выбросов в единицу времени за границу Γ области Ω .

$$\text{За критерий оптимальности примем условие: } v(\Omega) = \min. \quad (8)$$

Рассмотрим поведение нелинейных систем с зоной нечувствительности и двумя неограниченными зонами линейности и с упругими ограничителями. В качестве критерия, характеризующего состояние системы, используем число выбросов за данный уровень. Такая задача возникает при оценке надежности забойных двигателей (нелинейность вносят здесь осевые и радиальные опоры).

Для механической нелинейной системы при воздействии спектра «белый шум» получено среднее число выбросов за нулевой уровень

$$v = \frac{c}{2\pi m}, \quad (9)$$

где c – жесткость; m – масса системы.

Для нелинейной системы с зазором и упругими ограничителями

$$v = \frac{c(1 - v^2)}{2\pi m}, \quad (10)$$

где $v^2 = \frac{c_1 - c}{c}$, c_1 – жесткость упругого ограничителя.

Из выражений (9) и (10) можно видеть, что на число выбросов оказывает влияние жесткость системы и ее масса. Демпфирование не влияет на число выбросов. Оценка поведения линейной системы приводит к такому же результату. Таким образом, при воздействии на глубинное оборудование широкополосного спектра, близкого к «белому шуму», вопросы виброзащиты должны решаться путем изменения собственной частоты и массы объекта, демпфирование здесь играет второстепенную роль.

При воздействии узкополосного спектра на нелинейную систему нечувствительности и двумя неограниченными зонами линейности имеем

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha b}{n}}, \quad (11)$$

здесь α – параметр, характеризующий затухание корреляционной функции;

$b = K_1 / m$, где K_1 – статистический коэффициент усиления нелинейного звена по случайной составляющей;

n – параметр демпфирования.

В отличие от зависимостей (9) и (10), в которых отсутствует параметр демпфирования, в выражении (11) он присутствует. Анализ выражения (11) показывает, что с уменьшением частоты собственных колебаний уменьшается число выбросов, влияние демпфирования при воздействии узкополосного спектра также не является преобладающим, особенно при малой частоте собственных колебаний системы (рис. 3).

При определении вероятностных характеристик выбросов за установленный уровень правильно рассчитанный нормальный режим не должен приводить к «пробоям», или вернее, вероятность «пробоя» должна быть очень малой величиной, которая зависит от конкретных условий эксплуатации и требований к надежности конструкции.

Для стационарного случайного процесса число выбросов за уровень a равно

$$v = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_v}{\sigma_x} e^{-\frac{(a - \bar{x})^2}{2\sigma_x}}, \quad (12)$$

где σ_v, σ_x – среднеквадратичные значения скорости и перемещения;

\bar{x} – среднее значение случайного процесса.

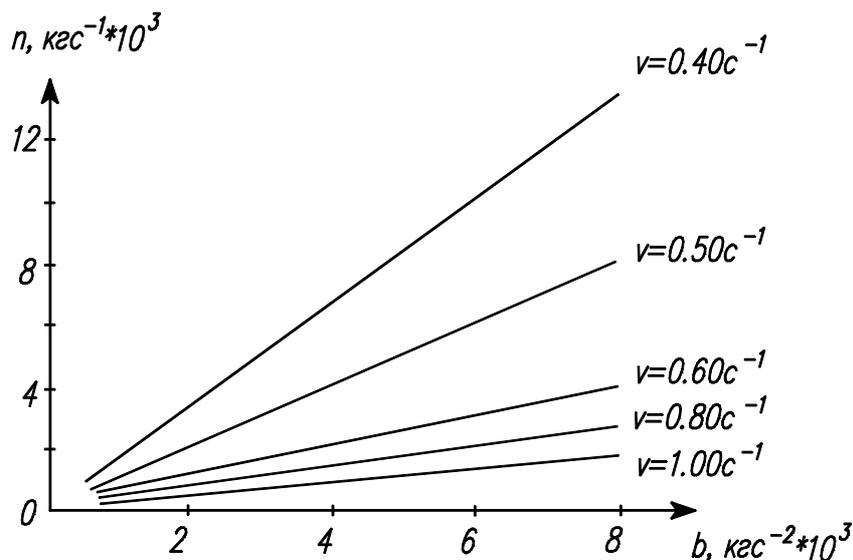


Рисунок 3 – Влияние параметров b и n на число выбросов ν при воздействии узкополосного спектра

В частном случае, когда $a = \bar{x}$, рассматриваем выбросы за нулевой уровень

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_v}{\sigma_x} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\left. \frac{\ddot{K}_x(\tau)}{K_x(\tau)} \right|_{\tau=0}}. \quad (13)$$

При аппроксимации случайного процесса корреляционной функцией вида (3) число выбросов за нулевой уровень равно

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}. \quad (14)$$

Таким образом, определение числа выбросов за нулевой уровень включает в себя аппроксимацию корреляционной функции, нахождению ее параметров α и β , и расчет по формулам (13) или (14).

При обработке записей колебаний осевой нагрузки на долото, выполненных станцией АСПБ на некоторых скважинах Нижневартовского УБР №2, оценивались зависимость числа выбросов за нулевой уровень от износа вооружения и опор долота, типа турбобура и глубины скважины; рассматривалось также влияние износа долота на коэффициент вариации в начале и конце долбления [4]. Установлено, что при износе долота меняется число выбросов, отмечается рост коэффициента вариации, свидетельствующего о динамичности процесса. В зависимости от типа турбобура наблюдалось некоторое различие в изменении числа выбросов. Например, диапазон изменения числа выбросов от коэффициента вариации у турбобура А7ПЗ больше, чем у турбобура ЗТСШ1-195 ТЛ. Это можно объяснить особенностями конструкции турбобура А7ПЗ в

сравнении с турбобуром ЗТСШ1-195 ТЛ.

Расчет диагностической ценности числа выбросов, как признака, показывает, что после проведения обследования состояния турбобура по этому показателю, неопределенность его состояния уменьшается. Таким образом, число выбросов за нулевой уровень осевой нагрузки на долото отражает особенности процесса бурения и технического состояния глубинного оборудования и в совокупности с другими диагностическими признаками может быть использовано в качестве одного из признаков, характеризующего техническое состояние глубинного оборудования, а также при выборе оптимальных параметров виброзащитных устройств.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Агеев А.Е. Основы расчета оптимальных и допускаемых режимов работы машинно-тракторных агрегатов. – Л.: Колос, 1978. – 296 с.
2. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Советское радио, 1968. – 256 с.
3. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов. – М.: Связь, 1980. – 216 с.
4. Ямалиев В.У., Ишемгужин И.Е. Диагностирование бурового и нефтепромыслового оборудования: Учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – 83 с.