

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ШТАНГОВЫХ НЕФТЯНЫХ УСТАНОВОК

На основе рассмотрения колонны штанг насосных установок в качестве механического канала связи, передающего информацию в виде волн деформации от плунжера насоса до точки подвеса штанг, спектральным методом получены выражения для гармонических составляющих усилия на плунжеры насоса через соответствующие сигналы усилия и хода, измеренные на поверхности. Отклонения формы плунжерной динамограммы от «эталонной», обусловленной классами состояния штанговой нефтяной установки «ШНУ», определяются измерением глубины амплитудной модуляции гармоник, обладающих максимальной чувствительностью к изменениям диагностируемого класса состояния ШНУ.

В России более 70% всего фонда нефтяных скважин эксплуатируются штанговыми нефтяными установками (ШНУ), в которых электродвигатель через редуктор и клиноременную передачу приводит в движение кривошипно-шатунный механизм, соединенный с балансиром, установленным на неподвижной стойке и сообщаемым возвратно-поступательное движение колонне штанг, опущенных в скважину. Нижний конец колонны штанг соединен с поршнем двухклапанного нефтяного насоса.

Тяжелые условия эксплуатации штанговых насосов (высокие температура и давление, наличие песка, парафина или газа в откачиваемой жидкости), как правило, вызывают неисправности в различных узлах ШНУ, приводящих к авариям как источникам экологического загрязнения.

В этих условиях одним из эффективных путей интенсификации добычи нефти является техническое диагностирование ШНУ. Оно позволяет: уменьшить простой скважины до ремонта и время ее работы с неисправным оборудованием, прогнозировать состояние ШНУ по техническому состоянию в анализируемый и предшествующий моменты времени, предсказывать неисправности в различных частях ШНУ.

С точки зрения автоматического контроля ШНУ является сложным и неудобным для диагностики объектом в силу непрерывного характера работы и необходимости диагностирования ШНУ в рабочем режиме, пространственной рассредоточенности объекта, значительно искажения поступающей на поверхность информации при прохождении по колонне штанг.

В связи с этим в настоящее время особую актуальность приобрели вопросы создания эффективных методов и средств технического ди-

агностирования с использованием «эталонных» моделей технологического процесса.

Информацию о техническом состоянии подземной части ШНУ получают в виде сигналов усилия  $P(t)$  и хода  $S(t)$  с выходов индуктивных датчиков, устанавливаемых на балансирах станка-качалки (СК). Исследования показали, что форма замкнутой кривой  $P = f(S)$ , представляющей собой зависимость усилия от перемещения точки подвеса штанг (ТПШ), так называемой динамограммы, соответствует определенному состоянию ШНУ. Однако из-за наличия колебательного процесса упругой системы «штанги – жидкость – трубы», интенсивность которого растет с увеличением глубины  $S$  спуска насоса и числа качаний  $n$  балансира, форма динамограммы может искажаться до практической невозможности ее визуальной интерпретации.

В связи с этим особое значение приобретают аналитические методы расчета динамограмм на плунжере насоса. Плунжерные динамограммы не подвержены влиянию колебательного процесса упругой системы «штанги – жидкость – трубы» и позволяют диагностировать ШНУ, работающие в особо сложных условиях.

Известны два аналитических метода расчета плунжерных динамограмм по данным наземных измерений сигналов усилия и хода: спектральный [1] и метод Даламбера-Римана [2]. В обоих методах колонна штанг рассматривается как механический канал связи, по которому передается информация в виде волн деформации от плунжера насоса до точки подвеса штанг. Математически этот канал описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial U(x;t)}{\partial t^2} + 2h \frac{\partial U(x;t)}{\partial t} - C^2 \frac{\partial^2 U(x;t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $U(x;t)$  – смещения сечения штанг по глубине  $X$  от своего исходного положения в течение времени  $t$ , М;  $h$  – коэффициенты вязкостного трения,  $1/С$ ;  $C$  – скорость звука в материале штанг, М/С.

Согласно спектральному методу, обеспечивающему минимум энергии ошибки аппроксимации, форму плунжерной динамограммы  $P_{nl} = f(S)$ , где  $P_{nl}$  – усилие на плунжере насоса,  $S$  – его ход, определяют по результатам измерения дискретных значений этих величин с помощью преобразования Фурье. Метод характеризуется следующими этапами. Измеряются дискретные значения сигналов усилия и хода за цикл качания СК с шагом дискретизации  $\Delta t$  и формируются два массива объемом  $N$  байт каждый.

Методом дискретного преобразования Фурье (ДПФ) определяются гармонические составляющие этих сигналов для наземной динамограммы:

$$a_p(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N P(i) \cos \left[ \frac{2\pi}{N} (i-1)k \right];$$

$$b_p(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N P(i) \sin \left[ \frac{2\pi}{N} (i-1)k \right];$$

$$a_s(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N S(i) \cos \left[ \frac{2\pi}{N} (i-1)k \right];$$

$$b_s(k) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N S(i) \sin \left[ \frac{2\pi}{N} (i-1)k \right],$$

где  $i$  – номер дискретного значения усилия (хода);  $k$  – номер гармоники.

Определяются коэффициенты, характеризующие распространение упругих колебаний по колонне штанг:

$$\left. \begin{aligned} \eta_k &= \frac{k\omega}{c\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{c\omega}\right)^2}} \\ \xi_k &= \frac{k\omega}{c\sqrt{2}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{c\omega}\right)^2}} \end{aligned} \right\}.$$

Решением волнового уравнения (1) спектральным методом, найденным в [1], определяется закон изменения амплитуды и фазы каждой гармоники сигнала усилия при прохождении волн деформации с поверхности до плунжера насоса. Согласно этому закону, гармонические составляющие усилия на плунжер насоса выражаются через соответствующие гармоники сигналов усилия и хода, измеренных на поверхности:

$$\left. \begin{aligned} a_{px}(k) &= \{b_p(k)Sh(\xi_k L) + \\ &+ Ef[b_s(k)\xi_k - a_s(k)r_k]Ch(\xi_k L)\} \sin(r_k L) + \\ &+ \{a_p(k)Ch(\xi_k L) + \\ &+ Ef[a_s(k)\xi_k - b_s(k)r_k] \times Sh(\xi_k L)\} \cos(r_k L) \\ b_{px}(k) &= \{b_p(k)Ch(\xi_k L) + \\ &+ Ef[b_s(k)\xi_k - a_s(k)r_k]Sh(\xi_k L)\} \sin(r_k L) - \\ &- \{a_p(k)Sh(\xi_k L) + Ef[a_s(k)\xi_k - b_s(k)r_k] \times \\ &\times Ch(\xi_k L)\} \sin(r_k L) \end{aligned} \right\}$$

где  $E$  – модуль упругости материала штанг,  $H/M^2$ ;  $f$  – площадь поперечного сечения штанг,  $M^2$ .

Методом обратного ДПФ восстанавливаются значения  $P_{nl}(i)$  усилия на плунжере насоса в дискретные моменты времени:

$$P_{nl}(i) = \frac{a_p(0)}{2} + \sum_{k=1}^M \left\{ \begin{aligned} &a_{px}(k) \cos \left[ \frac{2\pi}{N} (i-1)k \right] + \\ &+ b_{px}(k) \sin \left[ \frac{2\pi}{N} (i-1)k \right] \end{aligned} \right\},$$

где  $M$  – число гармоник.

Линейной интерполяцией по массивам  $S(i)$  и  $P_{nl}(i)$  определяется зависимость  $P_{nl} = f(S)$  усилия на плунжере от хода ТПШ.

Анализ полученных результатов показывает, что форма плунжерной динамограммы практически не искажена влиянием колебательного процесса в ШНУ (рис.1)

Отклонения формы плунжерной динамограммы от «эталонной», обусловленные классами состояния ШНУ (утечка в клапане; неправильная посадка плунжера; откачка с газом) имеют в качестве первопричины изменения формы зависимости  $P_{nl}(i)$  усилия на плунжере насоса в дискретные моменты времени.

Так как каждому классу состояния ШНУ соответствует определенная форма зависимости  $P_{nl}(i)$ , то изменения этой формы относительно соответствующей «эталонной» состоянию сопровождаются не только изменениями абсолютных значений гармоник с вполне определенными значениями их номеров, но и наличием гармоник, подвергающихся экстремальным (максимальным или минимальным) относительным изменениям амплитуд, создавая динамическую основу развития спектрального метода диагностирования класса состояния ШНУ в дополнение к методике, базирующейся на фиксации абсолютных значений, обладающих

наибольшими энергиями гармоник зависимости  $P_{пл}(i)$ .

Другим обстоятельством, учет которого необходим для обоснования метода диагностирования класса состояния ШНУ, является то, что в зоне максимальной чувствительности амплитуды «k»-ой гармоники к изменениям класса состояния ШНУ, гармоники с номерами «k±1» образуют биения колебаний, несущая частота которых

$$f_B = \frac{(k+1)f_{кр} + (k-1)f_{кр}}{2} = kf_{кр},$$

а частота огибающей биений колебаний

$$f_{ог} = \frac{(k+1)f_{кр} - (k-1)f_{кр}}{2} = f_{кр}.$$

Модели, отражающие процесс перехода от диагностирования «эталонного» состояния (нормальная работа) к диагностированию одного из других классов (с отклонением от нормальной работы) учитывают значимость диагностируемых состояний ШНУ путем использования суперпозиции «k»-ой гармоники, обладающей максимальной чувствительностью при переходе от «эталонного» рабочего режима к одному из характеризующих отклонение от «эталона» и гармоник с номерами «k±1»:

$$U_{\Sigma}(t) = U_{mk} \left[ \begin{matrix} \cos(k\omega_{кр}t + \varphi_{кр}) + \\ + \sqrt{1 + \xi^2 + 2\xi \cos \omega_{кр}t \cos(k\omega_{кр}t + \varphi_{кр})} \end{matrix} \right],$$

где  $\xi = \frac{U_m(k+1)}{U_m(k-1)}$  - коэффициент, учитывающий степень неравенства амплитуд гармоник.

Модели на основе модулированных колебаний, параметры которых определяются классами состояния ШНУ, названы модуляционными, позволяющими получить количественные оценки коэффициентов относительной глубины амплитудной модуляции.

Выделение обладающих максимальной чувствительностью к изменениям диагностируемого состояния ШНУ «k»-ых гармоник одновременно

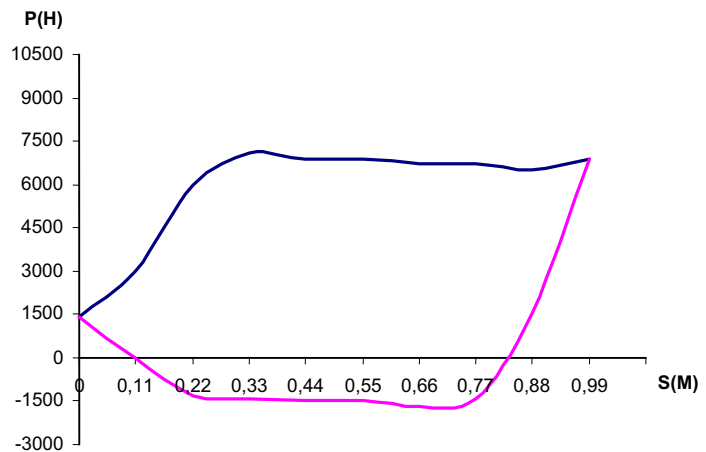


Рисунок 1.

менно с гармониками номеров «k+1» и «k-1» должно сопровождаться сохранением амплитудных и фазовых соотношений, характерных для них в сигнале  $P_{пл}(i)$ , что может быть обеспечено полосовыми фильтрами, основанными на использовании ортогонализирующих полиномов [3].

Для обеспечения эффекта полосовой фильтрации в диапазоне частот  $f_{кр}(k+1) \div f_{кр}(k-1)$  необходимо получить

$$U_{выхплф}(t) = U_{выхвч}(t) - [U_{вх}(t) - U_{выхнч}] = U_{вых_{k+1}}(t) - [P_i(t) - U_{вых_{k-1}}(t)],$$

т. е. сформировать базисную функцию

$$D_{ПФ}(X) = D_{k+1}(X) - D_{k-1}(X) = \frac{\sin\left[\left(k+1\right)\frac{X}{2}\right] - \sin\left[\left(k-1\right)\frac{X}{2}\right]}{2 \sin(X/2)} = \frac{\sin\left\{\left[\left(k+1\right)X - \left(k-1\right)X\right]/2\right\}}{\sin(X/2)} \cdot \cos\left\{\left[\left(k+1\right)X + \left(k-1\right)X\right]/2\right\},$$

которая в рассматриваемом случае наделяет  $U_{выхплф}(t)$  свойствами осциллирующей функции с глубиной амплитудной модуляции, определяемой классом состояния ШНУ.

**Список использованной литературы:**

1. Gibss S.G., Neely A.B. Computer diagnosis of down hole conditions in sucker rod running wells // Journal of Petroleum Technology.- 1986.-Vol 18, №1.-P.91-98.
2. Вирновский А.С. Способ вычисления величин, характеризующих работу глубиннонасосной установки, по данным наземных измерений.// Нефтяное хозяйство.-1952.-№5.-С.30-36.
3. В.Д. Шевеленко, В.И. Кутузов, А.Т. Раимова, Е.В. Квитек. Фильтрация измерительных сигналов формированием ортогонализирующих полиномов. «Электромагнитные волны и электронные системы». 2001.Т6. №2-3, стр.113-118.