

УДК 531/534:[57+61]

Е. С. МАНДРИК

Производственное объединение “БелНИПИнефть”

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ИНФОРМАТИВНОСТИ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ ПОГРУЖНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Обоснована необходимость калибровки измерительного канала вибрации в погружных телеметрических системах, применяемых в составе скважинных насосных установок для добычи нефти. Представлена методика и основные уравнения, позволяющие учесть и компенсировать параметрический разброс в случае применения первичных измерительных преобразователей, изготовленных по микроэлектромеханической технологии. Доказана эффективность применяемой методики калибровки на стенде вибрационных испытаний.

Ключевые слова: вибрационный стенд, калибровка, установка погружного электронасоса, погружная телеметрия, колебания, вибрация.

На нефтедобывающих промыслах Республики Беларусь и Российской Федерации широкое применение получили установки погружных электронасосов [1, 2]. Основным измерительным средством, применяемым в составе таких установок, является телеметрический блок, возможности которого позволяют не только в короткие сроки выводить скважину на проектный технологический режим [3], но и диагностировать состояние погружной установки по перегреву и вибрационной нагруженности [4, 5]. Опыт применения телеметрических блоков “ЦИКАДА-01” производства БелНИПИнефть [6] показал, что для измерения вибрации с применением первичных преобразователей, изготовленных по микроэлектромеханической технологии (МЭМС), требуются предварительная калибровка и стендовые испытания. Поэтому целью представленной работы является разработка методики, позволяющей обеспечить требуемую точность измерения параметров колебаний.

Погружная установка спускается на насосно-компрессорных трубах (НКТ) в нефтедобывающую скважину на глубину до двух километров, а электрическое питание и передача информации производится по трехжильному силовому кабелю, закрепленному вдоль НКТ. Погружной телеметрический блок (ПТБ) крепится в нижней части погружной электронасосной установки вблизи опорно-упорного подшипника электродвигателя, что позволяет проводить измерения параметров в одной из нагруженных точек конструкции.

На рисунке 1 показан погружной телеметрический блок для контроля параметров вибрации. В его конструкции предусмотрено отдельное крепление модуля акселерометра к корпусу, чтобы снизить погрешность измерения

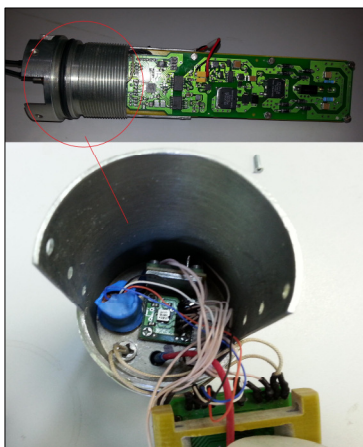


Рисунок 1 – Расположение акселерометра в основании корпуса погружного блока телеметрии

эмент пропорциональности изменяются в широких пределах, которые в случае применения среднего значения, указанного в документации на микросхему [7], приводят к относительной погрешности результатов измерений, превышающей 10 %.

С целью повышения точности измерения параметров вибрации по средствам данных первичных измерительных элементов рассмотрим математическую модель МЭМС-акселерометров, позволяющую связать параметр воздействия, в данном случае это проекция ускорения на соответствующую ось с выходным параметром – напряжением на выходе.

Соотношения выходного сигнала акселерометра для расчета ускорения по осям имеют вид:

$$\begin{cases} a_x = k_x (ADC_x + \Delta_x); \\ a_y = k_y (ADC_y + \Delta_y); \\ a_z = k_z (ADC_z + \Delta_z), \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ – коэффициенты, отражающие смещение нуля по осям x, y, z соответственно; k_x, k_y, k_z – коэффициенты, отражающие линейную зависимость показаний первичного преобразователя по соответствующим осям; ADC_x, ADC_y, ADC_z – значения сигнала с аналого-цифрового преобразователя акселерометра соответственно по осям x, y, z .

Калибровка заключается в определении значений коэффициентов k и Δ . Для их нахождения применим формулу взаимосвязи показаний первичного преобразователя, учитывающую, что в состоянии покоя векторная сумма

величин, вносимую изгибными колебаниями печатной платы, на которой расположена электронная схема. Для полноценного вибрационного мониторинга в данном блоке контролируются проекции ускорения на три взаимно перпендикулярные оси, что является минимальным и достаточным для определения угла отклонения оси скважины от вертикали, а также для независимой оценки вибрационной нагруженности в продольной и поперечной плоскости погружной установки.

Известно, что производители МЭМС-акселерометров гарантируют приемлемую точность в отношении линейной зависимости выходного параметра от ускорения по определённой оси. При этом параметры смещения нулевого значения и коэффици-

проекций ускорений на три взаимно перпендикулярные оси должна давать значение ускорения свободного падения. Таким образом,

$$k_x^2(ADC_x + \Delta_x)^2 + k_y^2(ADC_y + \Delta_y)^2 + k_z^2(ADC_z + \Delta_z)^2 = g^2, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Из уравнения (2) видно, что оно содержит шесть неизвестных, для нахождения которых необходимо произвести измерения как минимум для шести различных пространственно-ориентированных положений датчика. Необходимо заметить, что при этом не требуется применения дополнительного оборудования для инклинометрии и прецизионной фиксации датчика в пространственно-ориентированных точках калибровки [8, 9]. Основным недостатком данного метода расчета в общем случае является необходимость решения весьма громоздкой системы уравнений. С учетом этого факта, а также того, что все величины измеряются с некоторой погрешностью, возникает неприемлемо большая погрешность при определении каждого рассчитываемого коэффициента. Чтобы ее снизить, нами предлагается методика проведения калибровки посредством наклонного желоба (рисунок 2).

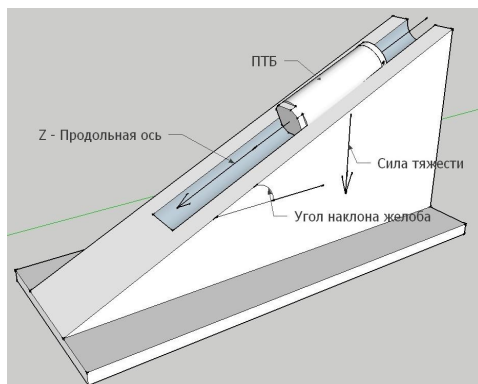


Рисунок 2 – Пространственная ориентация ПТБ посредством наклонного желоба

На первом этапе проверяется правильность монтажа акселерометра в корпусе ПТБ посредством оценки угла отклонения оси Z акселерометра от продольной оси ПТБ. Для этого замер сигнала по оси Z делается для четырех положений ориентации ПТБ, при которых датчик лежит на желобе, наклоненном под заданным углом α к горизонту, и при каждом последующем замере поворачивается вокруг своей продольной оси на 90° . При этом для каждого положения выполняется соотношение:

$$k_z(ADC_z + \Delta_z) = g(\sin(\alpha)\cos(\delta) - \cos(\alpha)\sin(\delta)\cos(\varphi_0)), \quad (3)$$

где α – угол наклона желоба к горизонту, δ – угол отклонения оси Z акселерометра от продольной оси ПТБ, φ_0 – начальный угол поворота ПТБ относи-

тельно положения, при котором фиксируется минимум значения сигнала по оси Z акселерометра.

Таким образом, получаем систему четырех уравнений, описывающую действие силы тяжести на измерительный элемент датчика в направлении оси Z при вышеуказанных положениях калибровки,

$$\begin{cases} k_z(ADC_{z,1} + \Delta_z) = g(\sin(\alpha)\cos(\delta) - \cos(\alpha)\sin(\delta)\cos(\varphi_0)); \\ k_z(ADC_{z,2} + \Delta_z) = g(\sin(\alpha)\cos(\delta) - \cos(\alpha)\sin(\delta)\cos(\varphi_0 + \frac{\pi}{2})); \\ k_z(ADC_{z,3} + \Delta_z) = g(\sin(\alpha)\cos(\delta) - \cos(\alpha)\sin(\delta)\cos(\varphi_0 + \pi)); \\ k_z(ADC_{z,4} + \Delta_z) = g\left(\sin(\alpha)\cos(\delta) - \cos(\alpha)\sin(\delta)\cos\left(\varphi_0 + \frac{3\pi}{2}\right)\right). \end{cases} \quad (4)$$

Из системы уравнений (4) получаем

$$\delta = \arcsin \left[k_z \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(ADC_{z,i} - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^n ADC_{z,k} \right)^2} / g \cos(\alpha)} \right]. \quad (5)$$

Для предварительной оценки значения угла δ принимается среднее значение коэффициента k_z из документации на акселерометр. При малом значении угла δ , не превышающем некоторое изначально заданное значение, переходим к следующему этапу калибровки. В противном случае осуществляется разборка и повторная сборка измерительного устройства.

На краю торца ПТБ делается реперная метка, после чего рассматриваются пять положений пространственной ориентации ПТБ:

- 1) измерительный блок лежит на наклонном желобе в положении, при котором реперная метка находится в нижней точке поперечного сечения;
- 2) устройство повернуто на 90° вокруг своей продольной оси по отношению к положению 1;
- 3) измерительный блок повернут вокруг своей продольной оси на 180° по отношению к положению 1;
- 4) устройство поворачивают аналогично положению 2, но на 270° по отношению к положению 1;
- 5) меняется ориентация измерительного блока на наклонной плоскости желоба на 180° по отношению к положению 3, при этом реперная метка снова располагается в нижней точке поперечного сечения, как и в положении 1.

Учитывая уравнение (1) для положений калибровки 1 и 5, рассчитаем Δ_z :

$$\Delta_z = \frac{-ADC_{z,1} - ADC_{z,5}}{2}, \quad (6)$$

где $ADC_{z,1}, ADC_{z,5}$ – значение сигнала с акселерометра для оси Z в положениях калибровки 1 и 5 соответственно.

Учтем соотношение (3) для положений калибровки 1 и 4, приняв угол отклонения оси Z акселерометра к продольной оси ПТБ равным нулю. Таким образом, рассчитывается уточненное значение k_z

$$k_z = \frac{2g \sin \alpha}{ADC_{z,1} - ADC_{z,5}}. \quad (7)$$

Далее, рассматривая показания акселерометра в положениях калибровки 1, 2 и 3, с учетом (1)–(3) рассчитываем остальные искомые коэффициенты:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_x = \frac{-ADC_{x,1} - ADC_{x,3}}{2}; \\ \Delta_y = \frac{-ADC_{y,1} - ADC_{y,3}}{2}; \\ A_1 = (ADC_{x,1} + \Delta_x)^2; \quad A_2 = (ADC_{x,2} + \Delta_x)^2; \\ B_1 = (ADC_{y,1} + \Delta_y)^2; \quad B_2 = (ADC_{y,2} + \Delta_y)^2; \\ k_x = g \cos \alpha \sqrt{\frac{B_2 - B_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1}}; \\ k_y = g \cos \alpha \sqrt{\frac{A_2 - A_1}{B_1 A_2 - B_2 A_1}}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Также для каждого из измерений АЦП предлагается производить от 10 и более аналого-цифровых преобразований, и в дальнейших расчетах применять их среднее значение, что позволит снизить случайную погрешность [10]. Таким образом, учитывая (7)–(9) по средствам калибровки в пяти пространственно-ориентированных точках ПТБ с предварительной оценкой правильности монтажа в четырех точках рассчитываются неизвестные коэффициенты уравнений (1).

Для реализации данного этапа калибровки было разработано программное обеспечение CalibraX (рисунок 3). Данная программа считывает показания АЦП, производит их математическую обработку, находя неизвестные коэффициенты из системы уравнений (2) и (3), после чего передает их в блок погружной телеметрии. Рассчитанные коэффициенты сохраняются в энерго-независимую память ПТБ и в дальнейшем используются во всех расчетах вибрационных параметров.



Рисунок 3 – Главное окно программы CalibraX

После калибровки по предложенной методике ПТБ испытывается на виб-рационном стенде с применением системы вибрационных испытаний TIRAS 5220-120 (рисунок 4). Данный стенд подключается к персональному компьютеру и посредством программного обеспечения VibrationVIEW позволяет смоделировать практически все виды вибрационных испытаний.

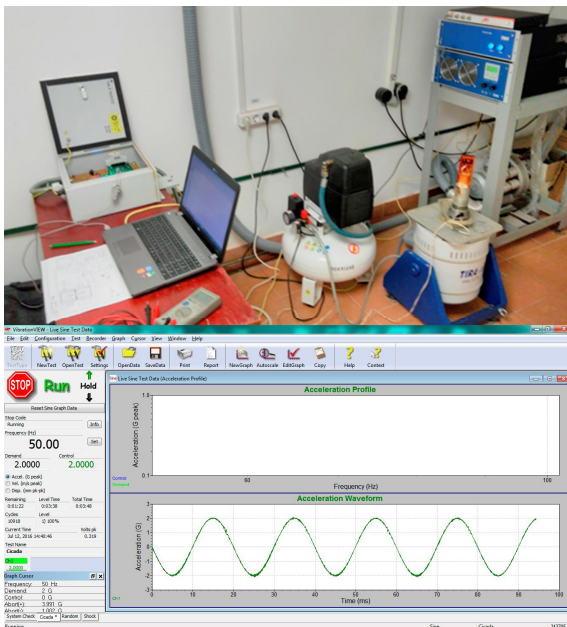


Рисунок 4 – Вибрационный стенд на основе системы вибрационных испытаний TIRAS 5220-120 и главное окно программы VibrationVIEW

Для удобства сравнения вибрационных параметров, заданных на стенде и измеренных посредством ПТБ, испытания проводятся на фиксированных частотах от 10 до 80 Гц с шагом 5 Гц, так как этот диапазон частот перекрывает рабочие частоты вращения ротора электропривода погружной насосной установки. Именно в этом диапазоне частот будет находиться основная гармоника вибрации при возникшем дисбалансе ротора [11, 12].

Выполненные на описанном стенде испытания позволили доказать эффективность предложенного метода калибровки и позволили снизить погрешность измерения в 5–10 раз по сравнению с некалиброванными датчиками.

Таким образом, калибровка показаний первичного измерительного преобразователя данным методом позволила снизить относительную погрешность рассчитываемого угла наклона, а также среднего квадратичного отклонения виброускорения и виброскорости менее чем до 3 %, что является приемлемым для подобных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Абдулин, Ф. С.** Добыча нефти и газа / Ф. С. Абдулин. – М. : Недра, 1983. – 256 с.
- 2 Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти : междунар. транслятор / В. Ю. Алекперов [и др.] ; под ред. В. Ю. Алекперова, В. Я. Кершенбаума; Междунар. инженер. акад. – М. : Наука и техника, 1998. – 611 с.
- 3 Скважинные насосные установки для добычи нефти / В. Н. Ивановский [и др.]. – М. : Нефть и газ РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. – 824 с.
- 4 Системы погружной телеметрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.scbores.ru/products/telemetry_systems. – Дата доступа : 11.07.2016.
- 5 Системы погружной телеметрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.irz.ru/products/3/index.htm>. – Дата доступа : 11.07.2016.
- 6 Системы контроля скважинные (СКС) СКАД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belorusneft.by/sitebeloil/ru/addUp/services/tech-means-controls/well-control-systems/>. – Дата доступа : 01.10.2017.
- 7 Data Sheet ADXL103/ADXL203 [Electronic resource]. – Режим доступа: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL103_203.pdf. – Дата доступа : 01.10.2017.
- 8 **Устюгов, М. Н.** Калибровка акселерометра бесплатформенной инерциальной навигационной системы / М. Н. Устюгов, М. А. Щипицына // Вестн. ЮУрГУ. – 2006. – № 14. – С. 140–143.
- 9 **Шаврин, В. В.** Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорения и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах / В. В. Шаврин, А. С. Конаков, В. И. Тисленко // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1, ч. 2. – С. 265–269.
- 10 **Емельянов, В. А.** Методы обработки результатов измерений в лаборатории физ-практикума / В. А. Емельянов, Д. Г. Лин, В. Ф. Шолох. – Минск : Бестпринт, 1997. – 90 с.
- 11 **Петрухин, В. В.** Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. – М. : Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.
- 12 Вибрации в технике. Справочник. В 6 т. / ред. совет : В. Н. Челомей (пред.). – М. : Машиностроение, 1980. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова, 1980. – 544 с.

Y. S. MANDRYK

*Belarusian Oil Research and Design Institute BelNIPIneft
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

A METHOD TO INCREASE ACCURACY AND INFORMATIVITY OF VIBRATION PARAMETERS FOR A SUBMERSIBLE TELEMETRIC SYSTEM

The article shows the need to calibrate the measuring vibration channel of submersible telemetric systems as a part of downhole pump assemblies used for oil production. There are presented a technique and basic equations allowing to take into account and compensate the parametric scatter associated with primary measuring transducers made by microelectromechanical technology. The effectiveness of the calibration technique is proved by vibration stand tests.

Получено 11.10.2017