

УДК 681.536.6

О ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Д. Г. Миловзоров¹, Е. С. Морозова², Г. Н. Ковшов³, А. В. Ужеловский⁴

¹midimka@yandex.ru, ²m_l_s@mail.ru, ³klabuk37@mail.ru, ⁴uadron@mail.ru

^{1,2} ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), Россия
^{3,4} ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» (ПГАСА), Украина

Поступила в редакцию 22.10.2013

Аннотация. Приводится описание снятия экспериментальных значений акселерометров и повышение их точности с помощью алгоритмического метода компенсации температуры и определение истинных выходных сигналов датчиков.

Ключевые слова: зенитный угол; акселерометр; температурный дрейф; линия тренда; аппаратная платформа; полином; алгоритмический метод.

Одним из важнейших вопросов при проведении горизонтальных скважин и боковых горизонтальных стволов, включающих интервалы интенсивного набора зенитного угла (угла отклонения от вертикали), является контроль угловых параметров пространственной ориентации траектории движения бурового инструмента [1].

При измерении зенитных углов в скважинах применяют инклинометрические системы, в состав которых входят акселерометрические датчики в интегральном исполнении. Наиболее широкое применение в последние годы в инклинометрической аппаратуре находят акселерометры серии ADXL. Непосредственно в эксплуатационных условиях, т. е. в скважине, инклинометрические системы подвержены влиянию повышенных температур [2]. Это оказывает существенное влияние на аппаратуру, в частности – на нештатные изменения (дрейф) информационных сигналов акселерометров, что, безусловно, приводит к появлению дополнительных погрешностей в определении зенитных углов при скважинных измерениях. В связи с этим исследование самих акселерометров, а также и инклинометрических систем с целью выявления и оценки температурных погрешностей и определения возможных путей их коррекции представляет собой вполне определенный научный и практический интерес.

Известны исследования зависимости показаний датчика ADXL 202 в интервале температур от -40 до $+20$ °С, в результате которых показано, что температурная зависимость выход-

ных сигналов носит линейный характер. Целесообразным представляется проведение комплекса экспериментальных исследований работы датчиков в расширенном интервале температур, исходя из реальных условий при бурении скважины (до $+130$ °С), а также, учитывая, что с увеличением глубины скважин температура повышается с каждым километром примерно на 60 °С. Так как фирмы-изготовители первичных преобразователей гарантируют усредненные показания точности работы датчиков в определенном температурном диапазоне, который существенно меньше температуры внутри скважины, то необходимо учитывать изменение ошибки выходных значений информационных сигналов самих акселерометров. Экспериментальные исследования показали, что в указанном температурном диапазоне два одинаковых акселерометра могут иметь совершенно разные значения. В связи с этим в определении аналитических зависимостей погрешностей определения зенитных углов $\Delta\theta = f(t)$ от влияния температуры является необходимым в плане реализации их дальнейшей алгоритмической коррекции. Осуществить это можно, установив дополнительный датчик температуры в среду, где находятся акселерометры. Получая информацию о температуре внутри скважины, появляется возможность корректировать выходные значения датчиков и получать более достоверные результаты, учитывающие температурный дрейф. Корректировка выходных сигналов первичных преобразователей возможна различны-

ми методами, но алгоритмический метод компенсации температурных дрейфов является и перспективным, и предпочтительным [1].

На рис.1 показан внешний вид измерительного устройства, которое включает в себя два двuosных акселерометра ADXL203 CE, ориентированных друг относительно друга и в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Причем, оси X1 и X2 у датчиков совпадают, но так как акселерометры повернуты относительно друг друга на угол π , то значения углов будут отличаться только знаком. Устройство также содержит дополнительный датчик температуры.

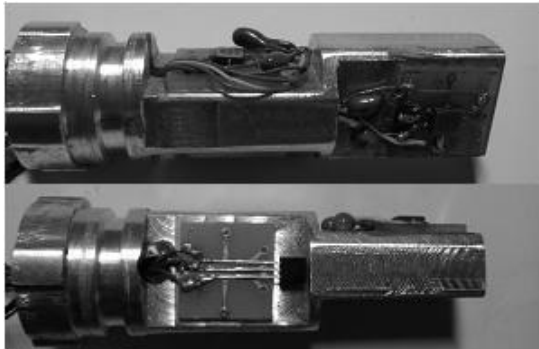


Рис. 1. Измерительное устройство на базе двух акселерометров ADXL203CE с установленным датчиком температуры

Исследования зависимости выходных информационных сигналов с акселерометров ADXL 203 CE проводились в интервале температур от $+22^{\circ}\text{C}$ до $+130^{\circ}\text{C}$ с целью определения линейности (или степени нелинейности) характеристик температурного дрейфа.

Экспериментальные исследования проводились на поворотном стенде в термокамере, имитирующей реальные температурные условия работы датчика. Информация записывалась и регистрировалась с использованием аппаратной платформы ArduinoATmega2560 по разработанному алгоритму. Ниже на рис. 3–5 приведены полученные зависимости.

Кроме того, исследования на термоустойчивость акселерометров, входящих непосредственно в состав скважинного прибора инклинометрической системы, осуществлялись в специализированном термостенде с электронагревом от промышленной сети, адаптированным под вытянутую конструкцию блока датчиков. Внешний вид термостенда со скважинным прибором представлен на рис. 2.

В результате исследований на возмущающее воздействие повышенных температур были установлены аналитические зависимости дрейфа

информационных сигналов, которые целесообразно представлять в полиномиальном виде.

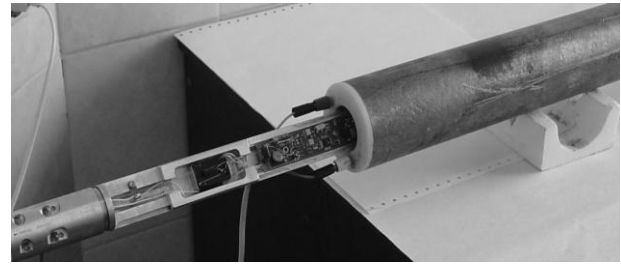


Рис. 2. Внешний вид цилиндрического термостенда с блоком датчиков инклинометрической системы

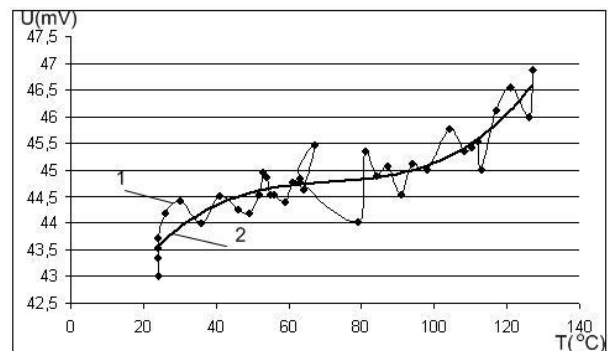


Рис. 3. Зависимость показаний акселерометра I от изменения температуры окружающей среды $U = f(T^{\circ}\text{C})$: 1 – кривая, полученная по экспериментальным данным; 2 – линия тренда, полученная на основании экспериментальной кривой I

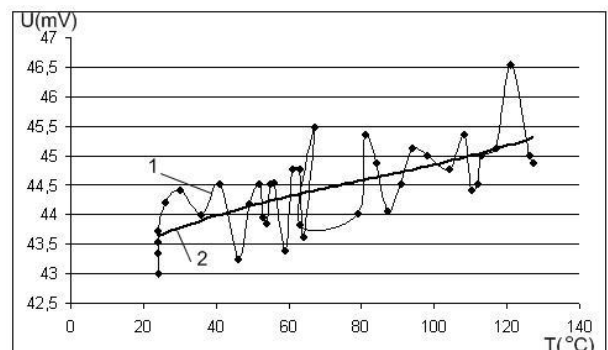


Рис. 4. Зависимость показаний акселерометра II от изменения температуры окружающей среды $U = f(T^{\circ}\text{C})$: 1 – кривая, полученная по экспериментальным данным; 2 – линия тренда, полученная на основании экспериментальной кривой I

Так, математическая зависимость показаний первого акселерометра определится полиномом $y = 9 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,002 \cdot x^2 + 0,1448 \cdot x + 41,093$ (y – сигнал с акселерометра, x – температура), а мате-

матическая зависимость показаний второго акселерометра, соответственно, имеет вид

$$y = 1 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0003 \cdot x^2 + 0,0355 \cdot x + 42,936.$$

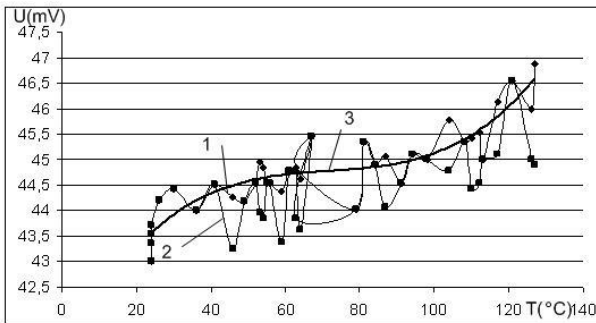


Рис. 5. Линия тренда зависимости показаний исследуемых акселерометров от изменения температуры окружающей среды $U = f(T^{\circ}C)$

На рис. 5 представлена линия тренда зависимости показаний исследуемых акселерометров от изменения температуры окружающей среды $U=f(T^{\circ}C)$: 1 – кривая, полученная по экспериментальным данным акселерометра I; 2 – кривая, полученная по экспериментальным данным акселерометра II; 3 – линия тренда, полученная на основании экспериментальных данных I и II акселерометра.

Машинная обработка экспериментальных исследований позволила получить выражения полинома 3-го порядка, обеспечивающего учет дополнительной температурной погрешности акселерометра.

Среднеквадратическое отклонение от полученных показаний двух акселерометров описывается полиномом третьего порядка

$$y = 9 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,002 \cdot x^2 + 0,1448 \cdot x + 41,093.$$

Результаты измерений обрабатывались с помощью программы Excel. С целью получения наибольшей достоверности зависимости показаний акселерометров от температуры обработка результатов осуществлялась построением линий тренда 1, 2, 3 и 4-го порядков и показала, что зависимость действительно носит нелинейный характер и нелинейность проявляется в большей степени при температурах 120–130° С. При этом температурную зависимость достаточно аппроксимировать полиномом 2 и 3-го порядков.

Полученные выше экспериментальные выходные значения акселерометров дают возможность определить их температурный дрейф, ис-

пользуя алгоритмический метод коррекции температурных погрешностей.

В общем виде математические модели электрических сигналов однополярного диапазона (рис. 6) с акселерометров серии ADXL 203 (103) записываются в виде:

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{2} \left[(M + N) + (M - N) \cdot \frac{G_{\text{ГПР}}}{|\vec{G}|} \right],$$

причем нулевые $(M + N)$ и максимальные $(M - N)$ значения сигналов в общем случае являются температурозависимыми, а выходной сигнал имеет вид

$$U_i(t) = U_{0i}(T) + U_{mi}(T)b_i,$$

где U_{0i}, U_{mi} – нулевые и максимальные значения выходных сигналов акселерометров; b_i – направляющие косинусы углов между векторами ускорения силы тяжести; T – температура окружающей среды.

Экспериментальные исследования показывают, что величины U_{0i}, U_{mi} существенно зависят от температуры. Величины $U_{0i}(T), U_{mi}(T)$ неизвестны, поэтому для их определения необходимо проводить температурные испытания для нескольких угловых положений:

$$U_{i1} = U_{0i}(T) + U_{mi}(T)b_{i1},$$

$$U_{i2} = U_{0i}(T) + U_{mi}(T)b_{i2},$$

$$b_i = \frac{U_i(T) - U_{0i}(T)}{U_{mi}(T)}.$$

Решение системы имеет вид:

$$U_{0i}(T) = U_{i1} - \frac{b_{i1}}{b_{i1} - b_{i2}} (U_{i1} - U_{i2})$$

$$U_{mi}(T) = \frac{1}{b_{i1} - b_{i2}} (U_{i1} - U_{i2}), i = 1, 2, 3.$$

Задавая различные пространственные положения акселерометра и изменяя температуру, получают значения U_{i1}, U_{i2} , вычислив функции $U_{0i}(T), U_{mi}(T)$. Затем вычисляют откорректированные величины зенитного угла.

Учитывая, что на выходе двухосевого акселерометра выходным сигналом является напряжение, то необходимо получить действительное значение зенитного угла. Значение ускорения, измеренное акселерометром по оси X , будет пропорционально синусу угла наклона, а значение ускорения, измеренное акселерометром по оси Y , – косинусу угла наклона. Исходя из функций синуса и косинуса, можно сказать, что когда чувствительность по одной оси уменьша-

ется, то по другой оси она будет увеличиваться. Расчет угла наклона акселерометра можно провести, воспользовавшись следующей формулой [4]:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{U_x}{U_y}; \quad \alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_x}{U_y}\right).$$

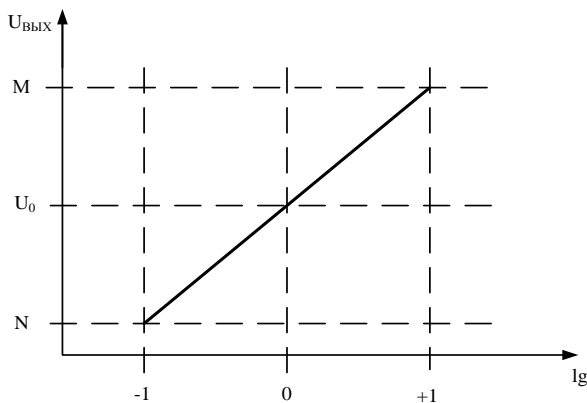
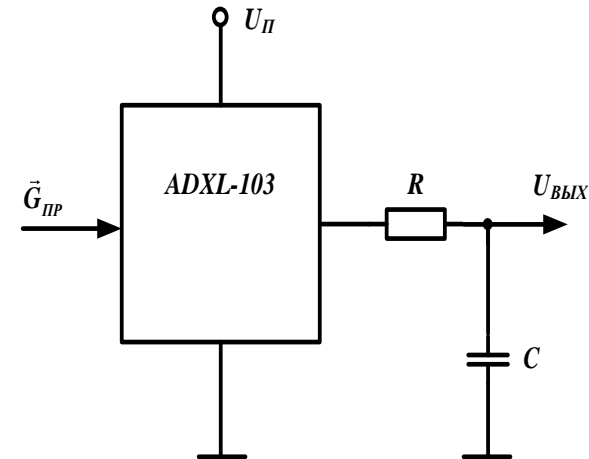


Рис. 6. Схема включения и статическая характеристика акселерометрического датчика

После обработки экспериментальных данных получены скорректированные значения, приведенные в таблице.

Таблица

t	$\alpha_1(t)$	$\alpha_2(t)$	b_1	b_2	α_3	α_4
90	90.2	0.54	0,59	0.725	90	0.5
100	90.28	0.57	0,594	0.726	90.11	0.51
120	90.4	0.8	0.611	0.728	90.09	0.55
130	91.02	1.01	0.614	0.730	90.01	0.56

ВЫВОДЫ

1. В результате экспериментальных исследований установлено, что зависимости $U=f(T^{\circ}\text{C})$ выходных информационных сигналов с акселерометров ADXL203 CE от температуры носят нелинейный характер и при их математическом описании целесообразно применять полиномиальную аппроксимацию третьего порядка.

2. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в диапазоне температур от $+90$ до $+130^{\circ}\text{C}$ линия тренда температурного дрейфа меняет свое положение, что соответствует увеличению ошибки значений выходных сигналов акселерометров.

3. Применение алгоритмического метода коррекции температурного дрейфа информационных сигналов с акселерометров ADXL203 CE представляется вполне эффективным и дает возможность уменьшить ошибку выходных значений акселерометров автоматизированным путем непосредственно при обработке результатов измерений в эксплуатационных условиях, что обеспечивает повышение точности определения искомых угловых параметров пространственной ориентации траектории скважин и скважинных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Инклинометры** (основы теории и проектирования) / Г. Н. Ковшов, Р. И. Алимбеков, А. В. Жибер. Уфа: Гилем, 1998. 380 с. [G. N. Kovshov, R. I. Alimbekov, A. V. Zhiber, *Inclinometers (basic theory and design)*, (in Russian). Ufa: Gilem, 1998.]
2. **Ковшов Г. Н., Коловертнов Г. Ю.** Приборы контроля пространственной ориентации при бурении. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. 228 с. [G. N. Kovshov, G. Y. Kolovertnov, *Gauges spatial orientation while drilling*, (in Russian). Ufa: USPTU, 2001.]
3. **Аглиуллин Ю. Ф., Нугаев И. Ф.** Автоматическая система ориентации бурового инструмента // Электроника, автоматика и измерительная техника: межвуз. сб. науч. тр. с междунар. участием. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 196–202. [Y. F. Agliullin, I. F. Nugaev, "Automatic orientation of the drilling tool," (in Russian), in *Electronics, automation and measuring technology: Interuniversity collection of scientific papers-nick with international participation*. Ufa, USATU, 2011.]
4. **Ковшов В. Д., Хакимьянов М. И., Сакаев А. Ф.** Датчик угла наклона на основе интегрального акселерометра: реализация и исследование характеристик // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: межвуз. сб. науч. ст. / Ред. В. А. Шабанов и др. Уфа: УГНТУ, 2005. С. 61–65. [V. D. Kovshov, M. I. Hakimyanov, A. F. Sakayev, "Tilt sensor based on the integral accelerometer implementation and study characteristics," (in Russian), in *Electrotechnology, electric and electrical enterprises: Interuniversity collection of scientific articles*, V. A. Shabanov, Ed., et al. Ufa: UGNTU, 2005.]

ОБ АВТОРАХ

МИЛОВЗОРОВ Дмитрий Георгиевич, доц. каф. электроники и биомедицинских технологий, докторант каф. инф.-измер. техники. Дипл. инж. по приборам и методам контроля качества и диагностики (Ижевск. гос. техн. ун-т, 2003). Иссл. в обл. инклинометрии.

МОРОЗОВА Елена Сергеевна, ст. преп. каф. инф.-измер. техники. Дипл. инж. по инф.-измер. техн. и технол. (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. инклинометрии.

КОВШОВ Геннадий Николаевич, проф. каф. прикл. механики. Дипл. инж.-мех. по гироскопич. приборам и устройствам (КАИ, 1959). Д-р техн. наук по элементам выч. техники (УАИ, 1982). Иссл. в обл. гироскопич. приборов и устройств.

УЖЕЛОВСКИЙ Андрей Валентинович, асс. каф. автоматики и электротехники. Дипл. магистр (Приднепровск. акад. строительства и архитектуры, 2008). Иссл. в обл. инклинометрии.

METADATA

Title: Polynomial correction accelerometer sensor temperature error.

Authors: D. G. Milovzorov¹, E. S. Morozova², G. N. Kovshov³, A. V. Uzhelovsky⁴

Affiliation:

^{1,2} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

^{3,4} Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA), Ukraine.

Email: ² m_l_s@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 1 (62), pp. 79-83, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Describes the removal of the experimental values of the accelerometers and increase their accuracy using algorithmic-ray temperature compensation method and the true definition of the sensor outputs.

Key words: zenith angle; accelerometer; temperature drift; the trend line; hardware platform; polynomial; algorithmic

About authors:

MILOVZOROV, Dmitry Georgievich, Docent, Dept. of electronics and biomedical technologies. Dipl. the engineer, specialty tools and methods for quality control and diagnostics (Izhevsk State Technical University, 2003). Research in the field of inclination.

MOROZOVA, Elena Sergeevna, senior lecturer, Dept. of information and measuring equipment. Dipl. the engineer, specialty Information and measuring equipment and technology (Ufa State Aviation Technical University, 1998). Research in the field of inclination.

KOVSHOV, Gennady Nikolaevich, Prof., Dept. Applied Mechanics, Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. Dipl. of mechanical engineering at the gyroscopic instruments and devices (Kazan Aviation Institute, 1959). Doctor of Technical Sciences in computing elements (Ufa Aviation Institute, 1982). Research in gyroscopic instruments and devices.

UZHELOVSKIY, Andrei Valentinovich, Assistant, Dept. Automation and Electrical Engineering, Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture.. Master's degree (Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2008). Research in the field of inclination.