

УДК 62.088.6: 531.768

Г. Н. Ковшов, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Садовникова, специалист,
Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры,
г. Днепропетровск

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАКЛОНА С ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Г.М. Ковшов, О.В. Садовникова. Перетворювач нахилу с температурною компенсацією для систем контролю та орієнтації об'єктів. Запропоновано метод температурної компенсації показань перетворювача нахилу на базі акселерометрів. Розроблено математичну модель перетворювача нахилу з урахуванням температурного дрейфу датчиків. Розроблена модель дозволяє підвищити точність вимірювань у 3...5 разів.

G N. Kovshov, A.V. Sadovnikova. Converter of the inclination with temperature compensation for the systems of monitoring and orientation of objects. The method of temperature compensation of the inclination converter readings on the basis of accelerometers is offered. The mathematical model the converter of inclining is developed with regard for temperature drift of sensors. The developed model allows to improve the accuracy of measurements 3...5 times.

Создание автоматизированных систем контроля и ориентации объектов обусловлено сложностью и постоянно возрастающими темпами производственных процессов. Повышаются требования к безопасности объектов, точности определения их пространственного положения. Эффективность же таких систем, прежде всего, зависит от технических характеристик устройств, на базе которых они функционируют. Так, использование преобразователей наклона (ПН) на основе акселерометров в качестве элементов систем ориентации позволяет с успехом решать сложные научно-технические задачи. К таким задачам можно отнести, например, бурение наклонно направленных скважин, мониторинг строительных сооружений, создание систем безопасности подъемно-транспортной техники и др. Особенностью перечисленных процессов является то, что работы проводятся, как правило, в сложных погодных условиях, при значительных колебаниях температуры окружающей среды $-40...+50$ °С.

Акселерометрические датчики являются высокоточными первичными преобразователями. В частности, акселерометры ADXL позволяют измерять ускорения в диапазоне от $\pm 5g$ до $\pm 1g$ с порогом чувствительности $5 \cdot 10^{-3} g$, остаются работоспособными после действия перегрузок до 1000 единиц, имеют частоту собственных колебаний 12 кГц [1]. Однако, несмотря на высокие точностные характеристики, показания акселерометров существенно зависят от изменения температуры окружающей среды. Таким образом, возникает вопрос о методах снижения температурных погрешностей для ПН на базе акселерометров.

Анализ известных работ в области создания датчиков свидетельствует о возрастающем интересе исследователей к математическим методам улучшения технических характеристик датчиков [2..5]. Однако преобладающими все еще являются конструкторские и технологические решения, возможности которых в настоящее время в значительной мере исчерпаны. В то же время применение математических методов в сочетании с вычислительной техникой имеет широкие перспективы развития.

Для определения пространственного положения объектов предлагается применять преобразователь наклона, состоящий из трех линейных акселерометров, оси чувствительности которых взаимно ортогональны. При этом предварительно проводятся температурные испытания акселерометров при постоянных значениях углов отклонения от вертикали. На основании экспериментальных данных определяются температурные коэффициенты дрейфа акселерометров, которые впоследствии учитываются при вычислении углов отклонения от вертикали в процессе измерений.

Составим математическую модель преобразователя наклона, позволяющую определять углы отклонения его от вертикали с учетом температурного дрейфа первичных преобразователей.

Введем неподвижную систему координат $O\xi\eta\zeta$ (репер R), связанную с Землей (рис. 1). Ось $O\zeta$ направлена по вертикали места измерения вглубь Земли, ось $O\xi$ лежит в плоскости горизонта и направлена по географическому меридиану на север, ось $O\eta$ — перпендикулярна осям $O\xi$, $O\zeta$ таким образом, чтобы трехгранник осей был правым. Репер R_1 получен из репера R поворотом вокруг оси $O\eta$ на угол β_1 в положительном направлении, репер R_2 — из репера R_1 поворотом вокруг оси Ox_2 на угол β_2 в положительном направлении.

С корпусом устройства свяжем систему координат $Ox_2y_2z_2$ (репер R_2), которая получена из исходной последовательным вращением на конечные углы β_1 , β_2 .

Такое задание последовательности поворотов определяет отклонение устройства от вертикали (зенитный угол θ) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Переход от неподвижной системы координат R к подвижной R_2 задается матрицей направляющих косинусов

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \beta_1 & 0 & -\sin \beta_1 \\ \sin \beta_1 \sin \beta_2 & \cos \beta_2 & \cos \beta_1 \sin \beta_2 \\ \sin \beta_1 \cos \beta_2 & -\sin \beta_2 & \cos \beta_1 \cos \beta_2 \end{bmatrix}.$$

Проектируя вектор ускорения силы тяжести на оси чувствительности соответственно 1, 2, 3 акселерометров и учитывая индивидуальные параметры датчиков, получим обобщенную математическую модель преобразователя наклона:

$$\begin{cases} \vec{g}_{R_2} = \mathbf{A} \vec{g}_R \\ U_1 = U_{01} + U_{m1} b_1 \\ U_2 = U_{02} + U_{m2} b_2 \\ U_3 = U_{03} + U_{m3} b_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где U_{0i} — нулевой сигнал i -го ($i=1, 2, 3$) акселерометра;

U_{mi} — наибольшее значение выходного сигнала i -го акселерометра;

b_i — безразмерные показания акселерометров.

При использовании такого устройства погрешность отклонения от вертикали не превышает 0,1 %. Однако проведение испытаний ПН показало, что влияние температуры выражается в появлении погрешностей, достигающих единиц градусов.

Учитывая, что такие процессы, как строительство и бурение скважин, относятся к медленно текущим, и измерительная аппаратура содержит в своем составе ЭВМ, предлагается на основании предварительно проведенных экспериментальных исследований определять температурные коэффициенты дрейфа акселерометров и использовать полученные данные для коррекции выходной измерительной информации.

В математических моделях электрической части датчиков параметры U_{0i} , U_{mi} являются функциями температуры, т. е.

$$U_i(T) = U_{0i}(T) + U_{mi}(T) b_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Известна аппроксимация температурного дрейфа акселерометров линейными функциями [6, 7]. Однако экспериментальные исследования показывают, что во многих случаях такой метод дает значительную среднеквадратическую погрешность (рис. 2).

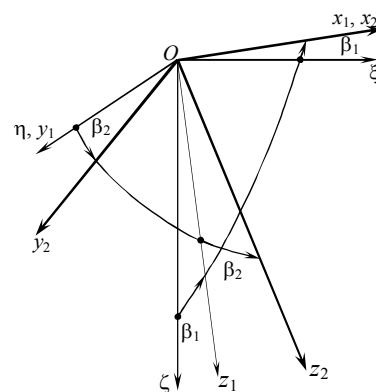


Рис. 1. Системы координат

В общем случае выходные параметры акселерометров являются функциями углов отклонения от вертикали и температуры.

Рассмотрим задачу установления зависимости выходных сигналов акселерометров от температуры на основе экспериментальных данных

$$V_{ijk} = V_{ijk}(\beta_{1j}, \beta_{2p}, T_k), \quad (3)$$

$$i = \overline{1,3}, \quad j = \overline{1,N}, \quad p = \overline{1,M}, \quad k = \overline{1,n},$$

где N, M — количество положений ПН в соответствующей плоскости;

n — количество значений температуры,

с использованием квадратичных функций. Требуется отыскать коэффициенты температурного дрейфа каждого акселерометра — параметры полиномов второй степени

$$v_i = A_i + B_i T + E_i T^2 + (C_i + D_i T + K_i T^2) b_i \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

соответствующих экспериментальной зависимости (3).

Вспользуемся методом наименьших квадратов [8].

Искомые параметры доставляют минимум функционалу

$$F_i(A_i, B_i, E_i, C_i, D_i, K_i) = \sum_{j=1}^N \sum_{p=1}^M \sum_{k=1}^n (V_{ijk} - v_{ijk})^2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

здесь, согласно (4),

$$v_{ijk} = A_i + B_i T_k + E_i T_k^2 + (C_i + D_i T_k + K_i T_k^2) b_{ijp}, \quad (6)$$

$$b_{ijp} = b_i(\beta_{1j}, \beta_{2p}),$$

при этом учитываем, что $U_{0i}(T) = A_i + B_i T_k + E_i T_k^2$; $U_{mi}(T) = C_i + D_i T_k + K_i T_k^2$.

В соответствии с методом наименьших квадратов приравняем к нулю частные производные функционала (5) по искомым параметрам и, разрешив полученную систему линейных уравнений, определим коэффициенты температурного дрейфа акселерометров.

Подставляя выражения (6) с уже определенными коэффициентами в систему (1), получим математическую модель преобразователя наклона, которая позволяет скомпенсировать температурный дрейф акселерометров и тем самым повысить точность определения пространственного положения объекта контроля.

Для проверки адекватности разработанной математической модели проведены эксперименты, в ходе которых температура окружающей среды посредством термостата изменялась от 20 до 65 °С. При этом положение датчика относительно вертикали Oz не изменялось. Затем искомые углы рассчитывались по формулам (1) без температурной коррекции показаний ПН и с использованием предложенной методики (рис. 3).

Сравнительный анализ результатов показывает, что учет в математической модели (1) температурного дрейфа акселерометров позволяет снизить погрешность показаний акселерометров до 0,1°.

Таким образом в соответствии с предложенной методикой определения коэффициентов степенного ряда, описывающего температурный дрейф датчиков, необходимо предварительно проводить температурные испытания ПН при постоянных значениях углов отклонения от вертикали, на основании экспериментальных данных определять температурные коэффициенты дрейфа акселерометров, значения температурного дрейфа заносить в память ЭВМ, которая обслуживает устройство ориентации. В процессе измерений вычисляются углы отклонения от вертикали с учетом величины температурного дрейфа каждого акселерометра.

Разработанная математическая модель ПН учитывает температурный дрейф первичных преобразователей, аппроксимированный степенными полиномами второго порядка.

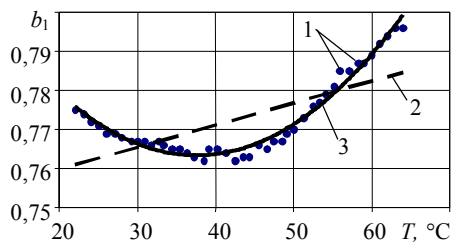


Рис. 2. Температурный дрейф акселерометра (1), аппроксимированный линейной (2), ($b_1 = 0,0006T + 0,7486$; $R^2 = 0,4859$) и квадратичной (3) ($b_1 = 5E - 05T^2 - 0,0039T + 0,8359$; $R^2 = 0,9759$) зависимостями

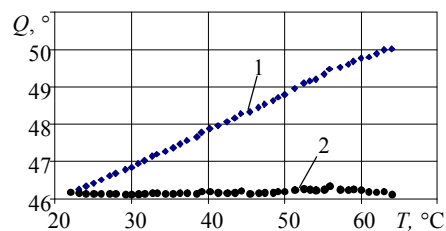


Рис. 3. Пример вычисления зенитного угла без учета температурного дрейфа (1) и с компенсацией температурного дрейфа (2)

Результаты экспериментальных исследований показывают, что учет температурного дрейфа акселерометров в диапазоне изменения температур $-40...+60$ °С позволяет в 3...5 раз снизить ошибку измерения по углу отклонения объекта контроля от вертикали.

Литература

1. ADXL105 – $\pm 5g$ Single Axis High Performance Accelerometer with Analog Output / Analog Devices, Inc. — 2005. — www.analog.com. — 17.10.2005.
2. Калинин М.А. О компенсации температурного ухода коэффициента преобразования акселерометра АЛЕ 055 // Датчики и системы. — 2004. — № 2. — С. 33 — 35.
3. Милвзорев Г.В. Моделирование и исследование инструментальных погрешностей трехкомпонентного акселерометрического преобразователя наклона // Измер. техника. — 1996. — № 10. — С. 22 — 26.
4. Сидоров Г.И. Термостабильный акселерометр / Сидоров Г.И., Резниченко Л.А. и др. // Фундамент. проблемы пьезоэлектроники. — 1995. — № 3. С. 162 — 164.
5. Слива Е.С. Коррекция по температуре измерительных преобразователей физических величин на базе микроконтроллера MSP430F149 фирмы Texas Instruments // Chip news. — 2003. — № 5. — Р. 21 — 27.
6. Слива Е.С. Коррекция характеристик первичных преобразователей по температуре // Вестник СГАУ. Сб. Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Ч. 2. — Самара, 1998. — С. 25 — 29.
7. Ковшов Г.Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Ковшов Г.Н., Коловертнов Г.Ю. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. — 228 с.
8. Лоусон Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов / Лоусон Ч., Хентон Р. — М.: Наука, 1986. — 656 с.

Поступила в редакцию 22 июня 2005 г.