

Повышение точности двухосного инклинометра посредством калибровки

Пашнин Сергей Владимирович, старший преподаватель
 Кацай Дмитрий Алексеевич, доцент
 Кондрух Елизавета Евгеньевна, студентка
 Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск)

В работе представлены результаты экспериментального исследования двухосного инклинометра, построенного на основе микроэлектромеханического акселерометра. Представлен алгоритм повышения точности показаний инклинометра на основе данных, получаемых в процессе его калибровки.

Ключевые слова: инклинометр, МЭМС акселерометр, калибровка.

Введение

Угловое положение объекта относительно местной вертикали в гравитационном поле Земли используют измерительный прибор, который называется инклинометр [1]. В качестве чувствительного элемента инклинометра использован трехосный микромеханический (МЭМС) акселерометр. С местной вертикалью связывают понятие плоскости горизонта, которая располагается под углом 90 градусов к вертикали. В процессе подготовки инклинометра к работе выполняется операция начальной выставки осей его чувствительности в плоскости горизонта. В процессе работы инклинометра он вместе с контролируемым объектом меняет свое угловое положение относительно плоскости горизонта, что приводит к появлению проекций ускорения свободного падения на оси его чувствительности [2]. По величинам измеренных проекций ускорения определяется угол наклона объекта относительно плоскости горизонта.

Для повышения точности измерений выполняется калибровка инклинометра. Под калибровкой средства измерения понимают совокупность операций, которые выполняются с целью определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений [3].

Проведение эксперимента

Экспериментальная установка представляет собой поворотную платформу с градуировкой, на которой устанавливается инклинометр.

Рассматриваемый инклинометр состоит из следующих электронных компонентов:

- трехосевой МЭМС-акселерометр ADXL345;
- микроконтроллер Arduino UNO.



Рис.1. Экспериментальная установка

При проведении эксперимента ставится и выполняется ряд требований:

- 1) температура воздуха в помещении в процессе эксперимента неизменна;
- 2) поверхность, на которой расположена экспериментальная установка, должна быть ровной, но не обязательно горизонтальной;
- 3) экспериментальная установка должна быть закреплена для надежной фиксации.

На рис.1 представлена экспериментальная установка, содержащая .

С целью проверки заявленной точности инклинометра проводится следующий эксперимент: проводились измерения в диапазоне угла наклона от -90° до $+90^\circ$ с шагом 10° . Результаты измерений представлены в таблице 1.

Абсолютная погрешность вычисляется по формуле:

$$\Delta_i = \beta_i^* - \beta_i, \quad (1)$$

где Δ_i – абсолютная погрешность i -го измерения, град;

β_i^* – угол наклона без калибровки, град;

β_i – угол наклона установки, град.

Показания инклинометра были рассчитаны из проекций по осям Ox и Oy по формуле:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{B_y}{B_z}\right), \quad (2)$$

где B_y, B_z – показания акселерометра по осям Oy и Oz соответственно.

На рис. 2 показана схема измерения угла наклона.

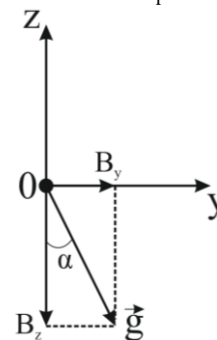


Рис. 2. Схема измерения угла наклона по оси Oy

Из таблицы 1 видно, что инклинометр на основе данного МЭМС-акселерометра имеет значительную погрешность измерения. С целью уменьшения погрешности необходимо произвести его калибровку по методике, изложенной в [4].

При калибровке акселерометра по первой оси, проводят измерения наклона в четырех ортогональных положениях с последовательным поворотом на 90° .

В каждом положении измеряем проекции A_{2i} и A_{3i} ($A_{2i} = A_{yi}, A_{3i} = A_{zi}$) вектора гравитационного уско-

рения \vec{G} на вторую и третью оси акселерометра соответственно [4]. Для повышения чистоты эксперимента проводится не менее трех измерений в каждом положении.

В таблице 2 представлены усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения при повороте относительно оси Ox в четырех ортогональных положениях.

Таблица 1. Усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения при повороте относительно оси Ox в диапазоне от -90° до $+90^\circ$ с шагом 10°

Номер измерения	Угол наклона, град.	Измеренный угол наклона без калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
1	-90	-77,6	12,36
2	-80	-68,0	11,96
3	-70	-59,2	10,83
4	-60	-49,2	10,83
5	-50	-41,0	8,96
6	-40	-32,4	7,59
7	-30	-24,5	5,54
8	-20	-16,3	3,74
9	-10	-7,95	2,05
10	0	0,24	0,24
11	10	8,72	-1,28
12	20	16,7	-3,30
13	30	24,6	-5,43
14	40	33,1	-6,89
15	50	41,3	-8,70
16	60	49,9	-10,09
17	70	58,6	-11,45
18	80	67,0	-12,98
19	90	76,0	-14,00

Таблица 2. Усредненные результаты измерения вектора гравитационного ускорения при повороте относительно оси Ox в четырех ортогональных положениях

Номер измерения, i	Угол поворота установки, град.	Показания датчика вокруг оси Ox , LSB		
		A_x	A_y	A_z
1	0	3,167	1,167	160,0
2	90	9,000	133,0	33,17
3	180	9,167	7,167	-96,33
4	270	8,000	-124,0	28,67

Согласно методике калибровки, изложенной в патенте [4], рассчитываются начальные смещения нуля (статические ошибки) – m_j , $j=1,2,3$ по трем осям и относительные коэффициенты чувствительности k_{31} и k_{32} между первой и третьей и первой и второй осями соответственно.

$$m_j = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{i=4} A_{ji}, \quad (3)$$

где i – номер оси акселерометра (Ox , Oy , Oz);
 j – номер измерения при проведении калибровки;
 A_{ij} – показание акселерометра при калибровке.

$$k_{31} = \sqrt{\frac{(A_{31} - A_{33})^2 + (A_{32} - A_{34})^2}{(A_{11} - A_{13})^2 + (A_{12} - A_{14})^2}}; \quad (4)$$

$$k_{32} = \sqrt{\frac{(A_{31} - A_{33})^2 + (A_{32} - A_{34})^2}{(A_{21} - A_{23})^2 + (A_{22} - A_{24})^2}}. \quad (5)$$

При этом, при проведении калибровки по методике не требуется определения коэффициентов чувствительности по каждой оси [4].

После этого были рассчитаны откалиброванные углы наклона акселерометра по формулам [4]:

$$\alpha_x = \arctg \left(\frac{k_{31} \cdot (B_1 - m_1)}{[k_{32} \cdot (B_2 - m_2)]^2 + (B_3 - m_3)^2} \right); \quad (6)$$

$$\alpha_y = \arctg \left(\frac{k_{32} \cdot (B_2 - m_2)}{[k_{31} \cdot (B_1 - m_1)]^2 + (B_3 - m_3)^2} \right); \quad (7)$$

где α_x и α_y – угол наклона акселерометра по 1-ой и 2-ой осям;

$B_j, j = 1, 2, 3$ – измеренный угол наклона в каждой строке.

Результат калибровки по оси Oy представлен в таблице 3.

Характеристикой погрешности считается ее стандартная ошибка (СКО), которая рассчитывается по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (8)$$

где S – среднеквадратическое отклонение;

n – количество значений в выборке;

x_i – i -ое значение в выборке;

\bar{x} – среднее значение выборки.

Аналогично проводится эксперимент и расчет СКО по второй оси. Полученные значения представлены в таблице 5.

Таблица 3. Результат калибровки по оси Oy

Угол наклона, град.	Угол наклона после калибровки, град.	Абсолютная погрешность, град.
-90	-87,94	2,06
-80	-81,89	-1,89
-70	-72,28	-2,28
-60	-61,11	-1,11
-50	-51,73	-1,73
-40	-41,55	-1,55
-30	-32,00	-2,00
-20	-22,04	-2,04
-10	-11,81	-1,81
0	-1,68	-1,68
10	8,85	-1,15
20	18,76	-1,24
30	28,53	-1,47
40	39,04	-0,96
50	49,03	-0,97
60	59,34	-0,66
70	69,49	-0,51
80	79,25	-0,75
90	89,23	-0,77

Таблица 5. Среднеквадратическое отклонение абсолютных погрешностей до и после калибровки

По оси Oy , град.		По оси Ox , град.	
До калибровки	После калибровки	До калибровки	После калибровки
9,07	0,94	9,39	1,41

На рис. 3 представлен график измерения угла наклона датчика по оси Oy до и после калибровки.

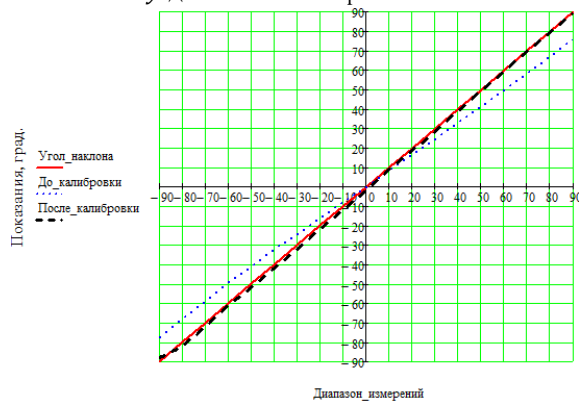


Рис. 3. График измерения угла наклона датчика по оси Oy до и после калибровки

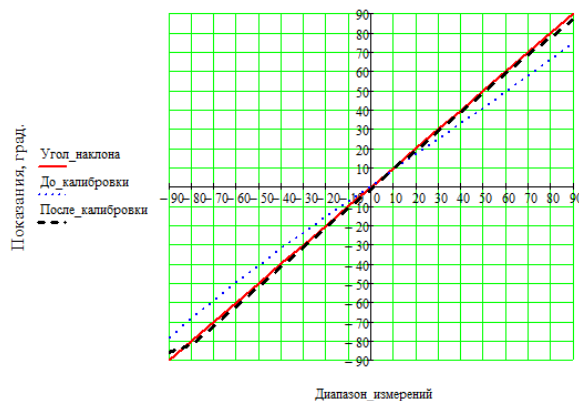


Рис. 4. График измерения угла наклона датчика по оси Ox до и после калибровки

На рис. 4 представлен график измерения угла наклона датчика по оси Ox до и после калибровки.

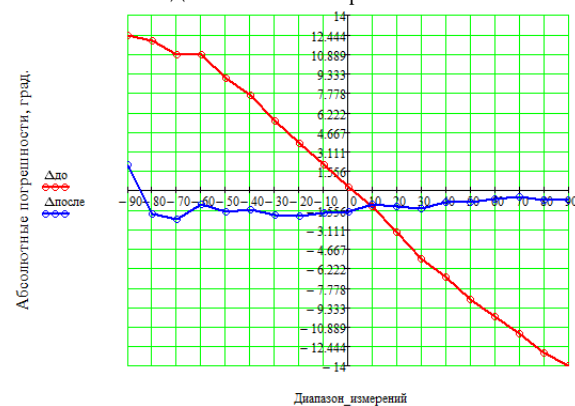


Рис. 5. Графики абсолютных погрешностей до и после калибровки относительно оси Oy

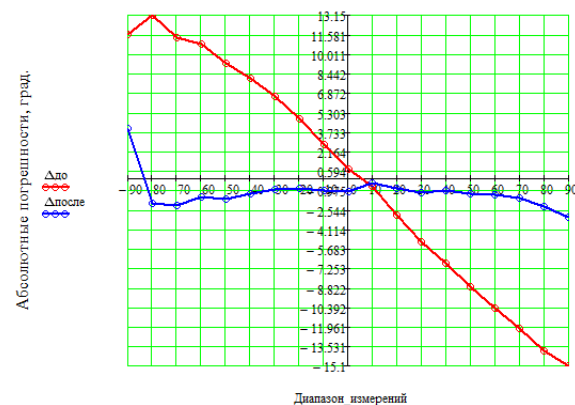


Рис. 6. Графики абсолютных погрешностей до и после калибровки по оси Ox

На рис. 5 представлен графики абсолютных погрешностей до и после калибровки по оси Oy .

На рис. 6 представлен графики абсолютных погрешностей до и после калибровки по оси Ox .

Таким образом, посредством калибровки удалось добиться значительного повышения точности измерения наклона инклинометра на основе недорогих электронных компонентов по двум осям.

Литература:

1. Определение угла наклона акселерометром. – <http://bitaks.com/resources/inclinometer/content.html>.
2. Саленко, Д.С. История развития и области применения технологии MEMS / Д.С. Саленко // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – Вып. 1. – №3 (5). – С. 68.
3. ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 8 с.
4. Пат. 2577806 Российская Федерация, МПК G01C 25/00. Способ калибровки акселерометрического трехосевого инклинометра / М.Г. Степанов, А.Ю. Каплин. – № 2014147522/28; заявл. 25.11.14; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8. – 11 с.