

О. В. Поплавная, К. Н. Шелкович

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Беларусь

Научный руководитель В. А. Хананов

Датчик угла наклона (инклинометр) – это прибор, предназначенный для измерения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли. В данной работе представлена разработка датчика угла наклона с точностью $0,5^\circ$, основанного на твердотельном микроэлектромеханическом (MEMS) акселерометре. В работе проведен математический анализ и выбор метода измерения; приведены результаты исследования прототипа; рассмотрены методы снижения влияния температурного дрейфа.

Вычисление угла наклона. На выходе акселерометра присутствует сигнал, пропорциональный проекции силы гравитации на чувствительную ось. В нашем случае это ось, перпендикулярная вектору силы гравитации земли, – ось X (рис. 1, *a*).

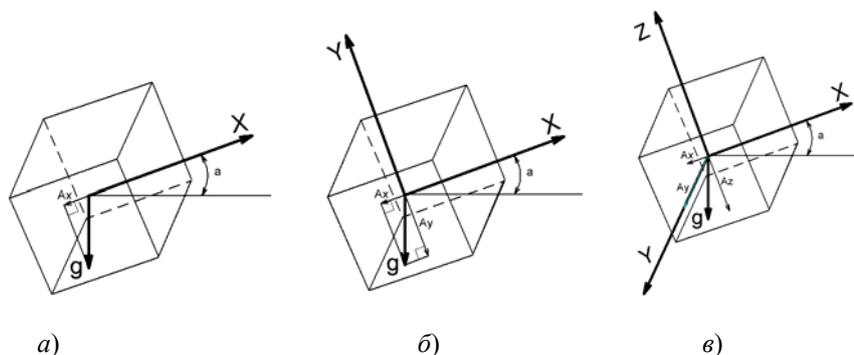


Рис. 1. Положение MEMS-акселерометра относительно вектора силы гравитации:
a – для одной чувствительной оси; *б* – для двух осей; *в* – для трех

Величина проекции зависит от угла наклона по синусоидальному закону [1] (1):

$$A_x = g \sin(\alpha), \quad (1)$$

где A_x – проекция вектора g на чувствительную ось X ; g – ускорение свободного падения; α – угол между осью акселерометра и горизонтом;

Соответственно, для вычисления угла наклона достаточно применить выражение (2):

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right). \quad (2)$$

На точность измерения угла наклона влияют два параметра: чувствительность акселерометра и разрядность АЦП, которым производится оцифровка выходного сигнала. Стоит обратить внимание на тот факт, что чувствительность акселерометра снижается по мере приближения угла α к 90° . В ходе исследования не удалось достигнуть требуемой точности при приближении к $\alpha = 90^\circ$, применяя формулу (1).

Повысить чувствительность при углах α , близких к 90° , а следовательно, попасть в допуски возможно путем введения дополнительной оси чувствительности y , перпендикулярной оси x , но также находящейся в плоскости действия силы гравитации (рис. 1, б). Если ускорение, измеренное акселерометром по оси X , будет пропорционально синусу угла наклона, то значение ускорения, измеренное акселерометром по оси Y , – косинусу угла наклона (3):

$$\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(\alpha). \quad (3)$$

Если воспользоваться отношением двух проекций (что равно тангенсу угла альфа), то угол вычисляется следующим образом:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A_x}{A_y}\right), \quad (4)$$

где A_y – проекция вектора g на чувствительную ось Y .

В тот момент, когда чувствительность по оси X будет уменьшаться, чувствительность по оси Y будет возрастать и компенсировать снижение. Следует отметить, что такая компенсация возможна только до тех пор, пока вектор силы тяжести находится в плоскости OXY (рис. 1, б). Для того чтобы наклон в плоскостях XOZ и YOZ не снижал точность измерений, целесообразно ввести третью ось Z (рис. 1, в). Следовательно, выражение (4) модифицируется следующим образом:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right), \quad (5)$$

где A_z – проекция вектора g на чувствительную ось Z .

Калибровка акселерометра. Калибровку проводим с помощью метода четырех измерений, который основывается на применении только силы тяжести.

С учетом начального смещения и чувствительности сенсора, все получаемые значения от акселерометра представлены следующим образом [2]:

$$A_x = A_0 + KA_{\text{действ}} \sin(\alpha), \quad (6)$$

где A_0 – начальное смещение; K – коэффициент чувствительности; $A_{\text{действ}}$ – действительное значение ускорения, действующего на сенсор; α – угол между действующим ускорением и чувствительной осью.

Для начальной калибровки требуется найти величины A_0 и K . Для этого снимем показания с акселерометра в положениях, когда ось чувствительности последова-

тельно повернута на угол 0° , 90° , 180° и 270° относительно начального. После сложения показаний получим формулы для нахождения начального смещения и коэффициента чувствительности:

$$A_0 = \frac{1}{4}(A_1 + A_2 + A_3 + A_4); \quad (7)$$

$$KA_{\text{дейст}} = \frac{1}{2} \sqrt{(A_1 - A_3)^2 + (A_1 - A_3)^2}. \quad (8)$$

Исследование опытного образца. В качестве опытного образца был выбран акселерометр ADXL325BPCZ. Исследование влияния температурного дрейфа проходило следующим образом: исследуемый образец неподвижно фиксировался в печи и нагревался до температуры от 13 до 80°C . С шагом в 1°C проводилась запись показаний по трем осям. После проведения измерений были получены температурные зависимости дрейфа нуля для каждой оси акселерометра (рис. 2, а). По полученным значениям были рассчитаны углы по формуле (5) (рис. 2, б).

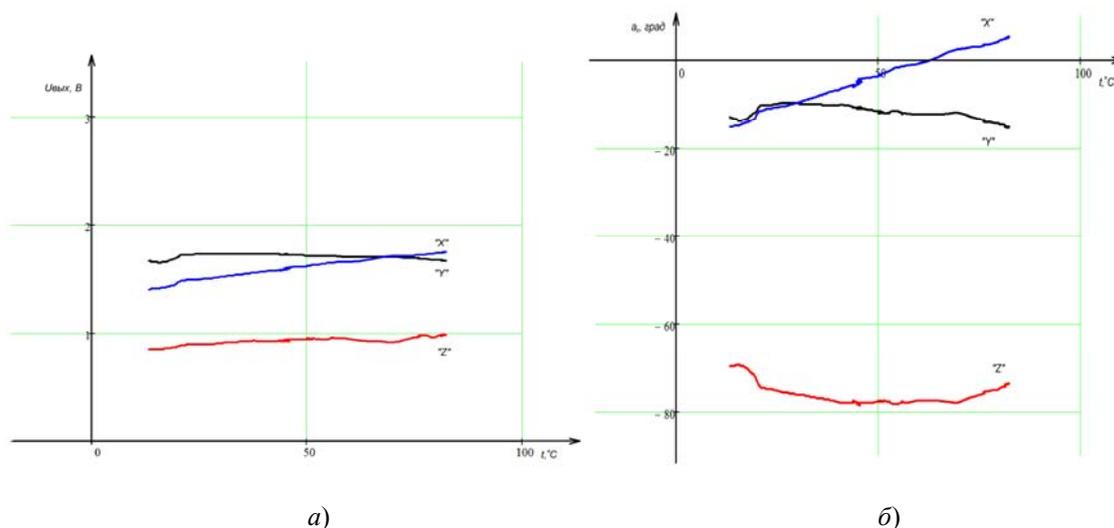


Рис. 2. Выходные сигналы:
а – напряжения на выходе акселерометра;
б – рассчитанные углы «трехосевым» методом

По графику видно, что максимальное отклонение по оси X составляет 20° . Это недопустимо для заданной точности измерений ($0,5^\circ$), поэтому необходимо уменьшить влияние температуры. Существуют два подхода для устранения влияния температурного дрейфа:

- 1) термостатирование;
- 2) применение калибровочной функции для текущей температуры акселерометра, рассчитанной по предварительно снятой температурной зависимости.

Первый способ требует высокого энергопотребления, поэтому неприменим для автономных устройств. Недостаток второго подхода – высокая трудоемкость.

Л и т е р а т у р а

1. Власенко, А. Инклинометр на базе микроконвертора ADuC845 и акселерометра adxl103 фирмы Analog Devices / А. Власенко // Компоненты и технологии. – 2006. – № 59.
2. Сысоева, С. Автомобильные Акселерометры. Часть 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых емкостных MEMS-акселерометров / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2006. – № 57.