

Инструментальные средства для экспериментального построения модели погрешностей МЭМС акселерометра

В.В. Аксенов

Южный федеральный университет

Аннотация: Рассматривается задача экспериментального определения параметров модели погрешности МЭМС акселерометров. Показаны возможные источники погрешностей и их характер. При разработке модели погрешностей учитывалось влияние неортогональности осей, температурных зависимостей коэффициента преобразования, смещения нулей. Разработана математическая модель погрешностей МЭМС акселерометра и алгоритм экспериментального определения ее параметров. Приводятся конкретные структурные схемы стендов. Описана их аппаратная и программная реализация. Рассмотрены конкретные особенности управления температурой в малогабаритной термокамере с нагревателем и охладителем на базе элемента Пельтье. Показан пример экспериментальной оценки параметров модели погрешности для одной оси акселерометра MPU6050. Разработанные средства позволяют начать систематическое исследование и объективное сравнение характеристик МЭМС акселерометров различных фирм, а также получить их рабочие модели погрешностей, пригодные для применения в алгоритмах фильтрации при построении различных систем инерциальной навигации и угловой стабилизации объектов.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, МЭМС, погрешности, модели, методы, конструкции, акселерометр, микросхема, моделирование.

Введение

Появление микроэлектромеханических систем (МЭМС) решило проблему внедрения инерциальных технологий в большую номенклатуру промышленных и бытовых устройств [1]. Одной из областей, где применяются МЭМС устройства, являются инерциальные навигационные системы (ИНС) [2,3]. При создании современных малогабаритных ИНС средней точности применяются бесплатформенные ИНС (БИНС), акселерометры и гироскопы в которых жестко связаны с объектом. Такие системы включают в себя МЭМС датчики угловых скоростей (ДУС), акселерометры и магнитометры для всех трех осей [4]. Для фильтрации уходов БИНС разработаны интегральные навигационные системы, которые используют приемники GPS/ ГЛОНАСС. В БИНС чаще всего используется фильтр Калмана для получения оптимальной оценки полученных данных

измерений. В МЭМС ДУС, также как и в МЭМС акселерометрах присутствует смещение и дрейф нуля, несоосность, ошибки из-за линейного ускорения по другим осям и погрешности масштабного коэффициента [5]. Наибольшая погрешность навигационного решения БИНС связана со смещением нуля гироскопов [6]. При работе автономной ИНС ошибки накапливаются в процессе интегрирования входных данных. Характер ошибок должен учитываться при настройке фильтра Калмана. Настройка фильтра Калмана возможна при знании характера связей погрешностей инерциальных датчиков и их зависимостей от различных возмущающих факторов. Современные исследования показывают [2,6,7], что ошибки БИНС, связанные с методами интегрирования и конечной разрядной сеткой вычислителей гораздо меньше ошибок, связанных с погрешностями инерциальных МЭМС датчиков. Таким образом, знание моделей погрешностей инерциальных МЭМС датчиков является актуальной и ключевой проблемой создания малогабаритных, надежных и дешевых БИНС.

Основная задача в рамках проблемы – построение адекватной модели погрешностей МЭМС акселерометров и определение ее коэффициентов. При решении этой задачи возможно двигаться двумя путями. Если проектируется новый МЭМС акселерометр, то на этапе создания точной 3D модели возможно определить коэффициенты модели погрешностей путем соответствующих численных экспериментов и проверить адекватность модели погрешности с помощью цифровой модели акселерометра [8-10]. Если необходимо построить модель погрешности готового МЭМС акселерометра, доступ к цифровой модели которого отсутствует, то необходимо произвести оценку коэффициентов модели с помощью ряда экспериментов с подачей на МЭМС акселерометр реальных механических, тепловых и электромагнитных воздействий. Фирмы-изготовители МЭМС акселерометров не публикуют моделей погрешностей своих изделий

(возможно их и не разрабатывают). Проектирование же современных БИНС без знаний этих моделей невозможно. Современные БИНС (особенно гибридные инерциальные навигационные системы) чаще всего используют как основу фильтр Калмана-Бьюси, настройка которого требует знаний ковариационных функций, которые, в свою очередь строятся на базе знаний моделей погрешностей составляющих БИНС [11].

Основные виды погрешностей МЭМС акселерометров

Абсолютная погрешность измерения ускорения — это отклонение результатов измерения ускорения от истинного значения измеряемой величины [2,6]. Основными причинами возникновения погрешностей измерений МЭМС-акселерометра являются следующие:

- 1) изменение температуры;
- 2) вибрации, действующие по всем осям;
- 3) ускорения по другим осям;
- 4) внутренние шумы акселерометра.

Изменения температуры при работе МЭМС акселерометра приводит к смещению нуля и изменению его коэффициента преобразования. В измерениях MEMS акселерометров присутствует фликкер-шум, окрашивающий шумы измерений. Наиболее важными характеристиками акселерометров для их сравнительного анализа являются смещение нуля, коэффициенты взаимовлияния осей, нестабильность смещения и шум [12]. Любая ошибка акселерометра в отсутствии действующего по этой оси ускорения при двойном интегрировании вызывает ошибку скорости, пропорциональную времени интегрирования, и ошибку в вычислении координаты, растущую со временем интегрирования по квадратичному закону.

Методы определения коэффициентов модели погрешностей

С целью изучения погрешностей работы акселерометров необходимо провести работу по созданию статистической базы. Для этого проведен ряд экспериментов с воздействиями, влияющими на показания акселерометров.

Для построения графика, который будет характеризовать экспериментальную закономерность (дрейф нуля), т.е., будет максимально близок к экспериментальным точкам, но в то же время останется нечувствителен к случайным отклонениям измеряемой величины, необходимо получить модели погрешности MEMS-датчиков.

Погрешности акселерометров можно подразделить на:

смещение нуля $\delta \dot{a}_x$ - измеряемое акселерометром кажущееся ускорение, когда в действительности по этой оси оно равно нулю.

ошибка масштабного коэффициента μ_{xx} - ошибка измерений акселерометра, прямо пропорциональная кажущемуся ускорению по измеряемой оси.

Ошибка вследствие неортогональности осей чувствительности акселерометра μ_{xz}, μ_{xy} - ошибки акселерометра, пропорциональные кажущимся ускорениям, действующим по остальным двум осям.

Остальные воздействия на акселерометр носят случайный характер и описываются как случайная ошибка [2,6,13].

Математическую модель погрешности акселерометра для канала ускорения по оси X можно описать в виде [6]:

$$\delta a_x = \delta \dot{a}_x + \mu_{xz} a_z + \mu_{xx} a_x + \mu_{xy} a_y + \delta \ddot{a}_x \quad (1)$$

Здесь $\delta \ddot{a}_x$ - случайная ошибка акселерометра.

В общем случае, (расширяя выражение (1) для всех осей) модель ошибки ускорения i -го акселерометра Δa_i , зависящей от ускорений по другим осям и температуры имеет вид:

$$\Delta a_i = a_w + k \cdot a + V + (k_{t_i} \cdot t^0 + k_{t_{t_i}} (t^0)^2) \cdot A_i, \quad (2)$$

где a_w – смещение нуля i -го акселерометра (м/с²);

$a = |A_x \ A_y \ A_z|^T$ – вектор ускорений (м/с²);

$k = |k_x \ k_y \ k_z|$, – вектор-строка, случайные компоненты которой определяют степень влияния перекрестных ускорений,

V - флюктуационная составляющая, аппроксимируемая белым гауссовским шумом с нулевым средним и известной дисперсией,

$k_{t_i}, k_{t_{t_i}}$ - коэффициенты полинома, аппроксимирующих зависимость коэффициента преобразования от температуры.

Обозначим в (2) $\mu_{11}, \mu_{21}, \mu_{31}$ - смещения нулей акселерометров $\mu_{12}, \mu_{22}, \mu_{32}$ - флюктуационные составляющие акселерометров, $\mu_{13}, \mu_{24}, \mu_{35}$ – ошибки масштабных коэффициентов акселерометров, $\mu_{14}, \mu_{15}, \mu_{23}, \mu_{25}, \mu_{33}, \mu_{34}$ – ошибки из-за неортогональности осей акселерометров.

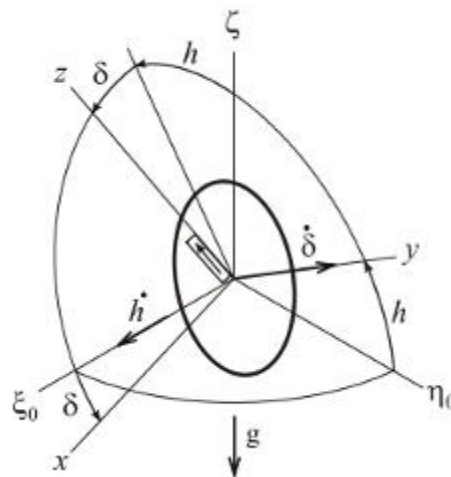


Рис. 1. - Углы поворота акселерометра на поворотном столе

Задача калибровки – определить параметры модели погрешностей. Рассмотрим наиболее интересный случай- определение модели погрешности

по каналу оси Z. Модели остальных осей можно определить по тому же алгоритму, изменяя закрепление акселерометра на поворотном столе. Поворотный стол имеет две степени свободы, обозначаемые углами h и δ . Угол наклона оси вращения поворотного стола h может изменяться от 0 до 90 градусов. Угол вращения поворотного стола δ изменяется от 0 до 360 градусов. Матрица направляющих косинусов A между исходной системой координат $\xi_0 \eta_0 \zeta$ и системой xyz поворотного стола приведена в таблице 1.

Таблица № 1

Матрица направляющих косинусов A между исходной системой координат $\xi_0 \eta_0 \zeta$ и системой xyz поворотного стола

A	ξ_0	η_0	ζ
x	$\cos \delta$	$\sin h \sin \delta$	$-\cos h \sin \delta$
y	0	$\cos h$	$\sin h$
z	$\sin \delta$	$-\sin h \cos \delta$	$\cos h \cos \delta$

На акселерометр, установленный на поворотном столе, действует ускорение силы тяжести g . Проекция ускорения силы тяжести g на оси поворотного стола xyz имеют вид (с учетом отрицательного направления g):

$$\begin{aligned}g_x &= g \sin \delta \cos h, \\g_y &= -g \sin h, \\g_z &= -g \cos \delta \cos h.\end{aligned}\tag{3}$$

Выходной сигнал канала Z акселерометра

$$g_{zp} = g_z(1 + \delta M) + \Delta a_z + g_x \mu_{33} + g_y \mu_{34}\tag{4}$$

где δM - относительная погрешность масштабного коэффициента,

Δa_z - смещение нуля акселерометра.

После подстановки выражений (3) в (4)

$$g_{zp} = -g \cos \delta \cos h(1 + \delta M) + \Delta a_z + g \sin \delta \cos h \mu_{33} - g \sin h \mu_{34}\tag{5}$$

Разделим обе части выражения (5) на g , тогда нормированный (в величинах g) сигнал будет равен:

$$G_N = -\cos \delta \cos h(1 + \delta M) + \Delta a_z / g + \sin \delta \cos h \mu_{33} - \sin h \mu_{34}$$

$$G_N = -\cos \delta \cos h - \cos \delta \cos h \delta M + \Delta a_z / g + \sin \delta \cos h \mu_{33} - \sin h \mu_{34} \quad (6)$$

Проведя серию измерений нормированного ускорения при разных δ и h , можно методом наименьших квадратов (МНК) определить параметры модели погрешности акселерометра.

Серию измерений при изменении угла δ можно представить в виде:

$$G_{N1} = -\cos \delta_1 \cos h - \cos \delta_1 \cos h \delta M + \Delta a_z / g + \sin \delta_1 \cos h \mu_{33} - \sin h \mu_{34}$$

$$G_{N2} = -\cos \delta_1 \cos h - \cos \delta_2 \cos h \delta M + \Delta a_z / g + \sin \delta_2 \cos h \mu_{33} - \sin h \mu_{34} \quad (7)$$

...

$$G_{Nk} = -\cos \delta_k \cos h - \cos \delta_k \cos h \delta M + \Delta a_z / g + \sin \delta_k \cos h \mu_{33} - \sin h \mu_{34}$$

где k - число измерений.

Для корректной работы алгоритма МНК необходимо выполнение условия $k \gg 5$. Запишем эти выражения (7) в матричной форме

$$|G| = |S| \cdot |X| \quad (8)$$

где

$|G|$ - вектор измеренного нормированного ускорения,

$$|X| = \begin{pmatrix} 1 \\ \delta M \\ \Delta a_z \\ \mu_{33} \\ \mu_{34} \end{pmatrix} \text{ - вектор параметров,}$$

$$|S| = \begin{pmatrix} \cos \delta_1 \cosh & \cos \delta_1 \cosh & \frac{1}{g} & -\sin \delta_1 \cosh & -\sinh \\ \cos \delta_2 \cosh & \cos \delta_2 \cosh & \frac{1}{g} & -\sin \delta_2 \cosh & -\sinh \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cos \delta_k \cosh & \cos \delta_k \cosh & \frac{1}{g} & -\sin \delta_k \cosh & -\sinh \end{pmatrix} \text{ - матрица модели сигнала}$$

Для нахождения оценок вектора параметров X из выражения (8) используем МНК в пакетной форме:

$$X = (S^T \cdot S)^{-1} \cdot S^T \cdot G \quad (9)$$

Алгоритм калибровки i -го акселерометра

Для определения коэффициентов модели реализуются следующие операции:

- ось чувствительности акселерометра последовательно переводится в K различных ориентаций относительно вектора g , для каждой из которых заранее осуществляется вычисление проекций ускорений A_y, A_z, A_x на оси акселерометров.
 - в каждой ориентации осуществляется измерение ускорения a_i на интервале времени T , ориентировочно равном времени работы БИНС в реальном изделии;
 - в каждой ориентации осуществляется выделение постоянной составляющей сигнала a_i фильтр(№ориентации) (программным фильтром Баттерворта 6 порядка), т.е. отсечение переменной составляющей;
 - в каждой ориентации осуществляется определение погрешности $\Delta a_i(\text{№ориентации}) = a_i \text{const}(\text{№ориентации}) - a_i \text{фильтр}(\text{№ориентации})$;
 - после набора k значений $\Delta a_i(\text{№ориентации})$, формируется система из k линейных уравнений вида (7) относительно 5 неизвестных коэффициентов $K_z, \delta M, \Delta a_z, \mu_{33}, \mu_{34}$. В левой части системы – значения $\Delta a_i(\text{№ориентации})$, в правую часть подставляются значения A_y, A_z, A_x , вычисленные ранее для соответствующих ориентаций.
-

— - после решения данной системы методом пакетного МНК определяются коэффициенты модели погрешности δM , Δz , μ_{33} , μ_{34} .

Аппаратные средства стенда для оценки погрешностей МЭМС акселерометров

Для проведения исследований модели погрешностей MEMS-датчиков разработано программное обеспечение на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США) LabVIEW, а также в среде Simulink MatLab.

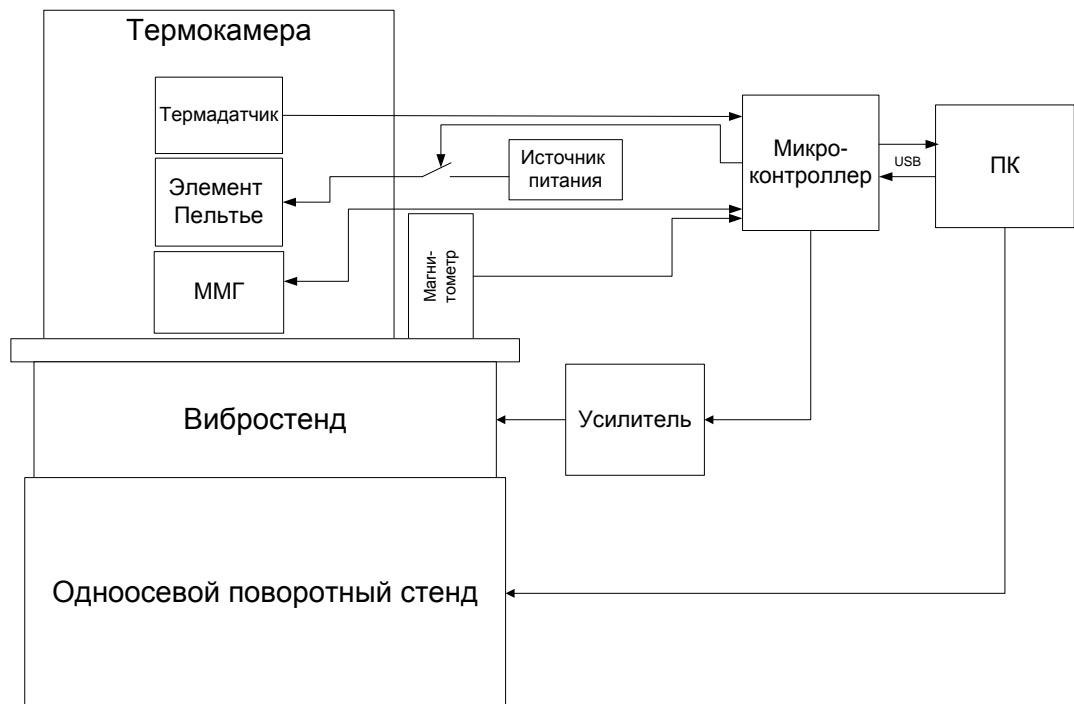


Рис. 2. - Структурная схема инструментальных средств

В работе используется одноосевой стенд XBlue (рис. 3), с помощью которого можно исследовать процессы поведения модели погрешностей MEMS-датчиков и трехосевой стенд XBlue (рис. 5), с помощью которого можно задавать как повороты, так и наклоны исследуемых MEMS-датчиков. Структурная схема исследования показана на рисунке 4.



Рис. 3. - Одноосевой стенд IxBlue EVO-10-L

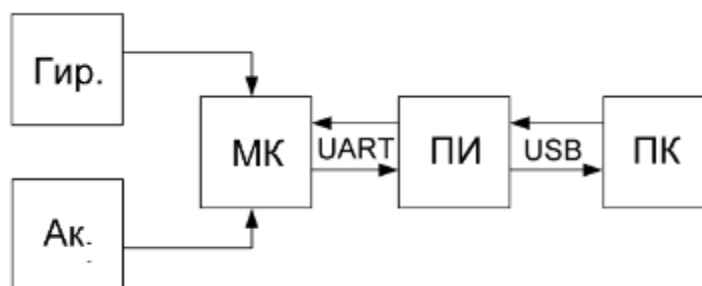


Рис. 4. - Структурная схема исследования

Ак-акселерометр, Гир – ДУС, МК – микроконтроллер, ПИ – преобразователь интерфейсов, ПК – персональный компьютер.

Полученные данные, поступающие с цифрового выхода МЭМС - датчиков, непосредственно связанного с микроконтроллером, не подвергаются аналоговой фильтрации. Для передачи данных из микроконтроллера в ПК разработан специализированный протокол передачи данных на основе MODBUS RTU. Обмен информации осуществляется путем формирования пакетов данных по каждой из оси трехосевого акселерометра и датчика угловых скоростей. Далее, при помощи преобразователя интерфейсов, данные направляются по USB 2.0 в ПК, для обработки.



Рис. 5. - Трехосевой стенд IxBlue

На поворотном столе размещается термокамера (рисунок 6) с собственно исследуемым инерциальным модулем. Датчиком температуры служит термодатчик с интерфейсом 1Ware, Нагрев осуществляется электронагревателем, охлаждение – элементом Пельтье. Термокамерой управляет микроконтроллер ATmega328.

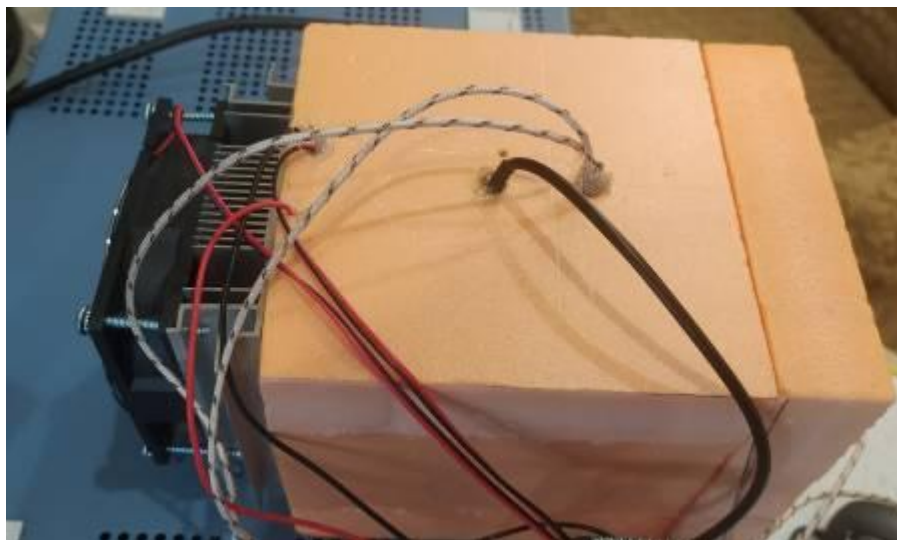


Рис. 6. - Термокамера, слева виден вентилятор элемента Пельтье

Программное обеспечение стенда для оценки погрешностей МЭМС акселерометров

Управление наклонами стенда производится штатным программным обеспечением стенда IxBlue EVO-10-L. Для поддержания заданной температуры используется приведенная ниже программа для микроконтроллера. Алгоритм – ПИД регулятор. Тестирование показало, что критический по времени режим – охлаждение. При разработке программы микроконтроллера использовалась библиотека OneWire.

Нагреватель и элемент Пельтье подключаются выходам широтн-импульсных модуляторов (ШИМ):

```
#include <OneWire.h>
#define Could 9 // ШИМ для элемента Пельтье
#define Warm 10 // ШИМ для нагревателя
OneWire ds(11); // термодатчик подключаем к 11 выводу с 4.7K
резистором на +5В
```

Фрагмент программы микроконтроллера, реализующий алгоритм ПИД приводится ниже.

```
celsius = (float)raw / 16.0; // преобразование в градусы Цельсия
err=celsius-tzad; // Вычисление сигнала ошибки
Integ=Integ+0.05*err; // Вычисление интеграла ошибки
if (Integ>20)Integ=20; // Ограничение интеграла ошибки сверху
if (Integ<-20)Integ=-20; // Ограничение интеграла ошибки снизу
com=err*100+Integ*24-20*(err-err1); // Вычисление управляющего
воздействия ПИД
err1=err; //
if (com>255) com=255; // Ограничение управляющего воздействия
сверху
```

```
if (com<-255) com=-255; // Ограничение управляющего воздействия  
снизу
```

```
if (com>0){  
  com=com+20;  
  if (com>255) com=255;  
  analogWrite(Could,com); // Включение элемента Пельтье  
  analogWrite(Warm,0); // Выключение нагревателя  
}  
else {  
  analogWrite(Could,0); // Выключение элемента Пельтье  
  analogWrite(Warm,-(com/16)); // Включение нагревателя  
}
```

Тестирование показало, что критический по времени режим – охлаждение. На рисунке 7 показаны тренды измеряемой температуры, ошибки и интеграла ошибки.

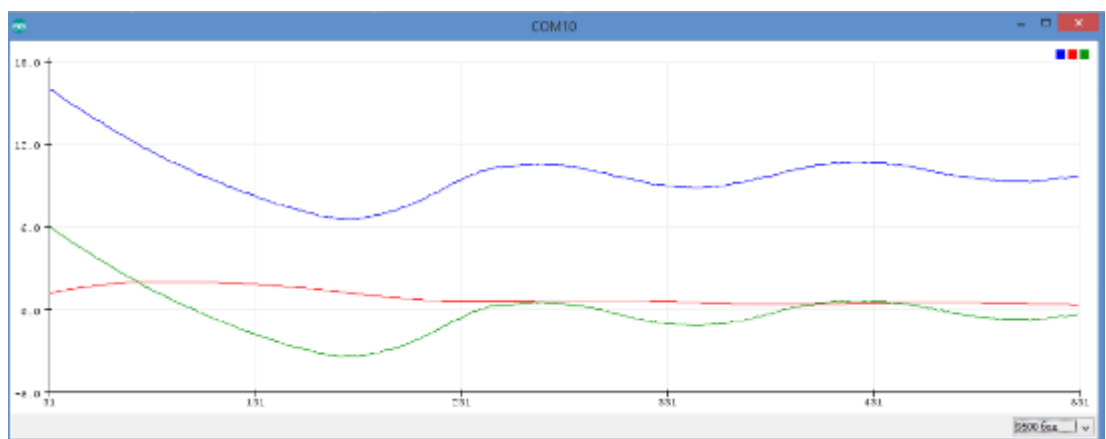


Рис. 7. - Тренды работы ПИД регулятора температуры

Видно, что при исходной ошибке 10 градусов, за 500 секунд она сведена к нулю и далее по амплитуде не превышает 1 градуса.

Исследование каналов акселерометров датчика MPU6050

Для исследования выбран один канал акселерометра инерциального датчика MPU6050 – a_z . При исследовании угол установки акселерометра изменяется от 0 до 44 градусов, формируя дополнительное ускорение по оси A_x . Результаты измерения показаны в таблице 2 и приведены на рисунке 8.

Таблица №2.

Экспериментальная зависимость ускорения по каналу Z в зависимости от угла установки MPU6050:

Угол установки, градус	Ускорение по оси Z, м/сек ²
0	9.93510
2	9.93101
4	9.91662
6	9.88690
8	9.84678
10	9.79542
12	9.73050
14	9.65419
16	9.56696
18	9.46777
20	9.35620
22	9.23488
24	9.10060
26	8.95784
28	8.80079
30	8.63528
32	8.46015
34	8.27216
36	8.07623
38	7.86862
40	7.65326
42	7.42811
44	7.19335

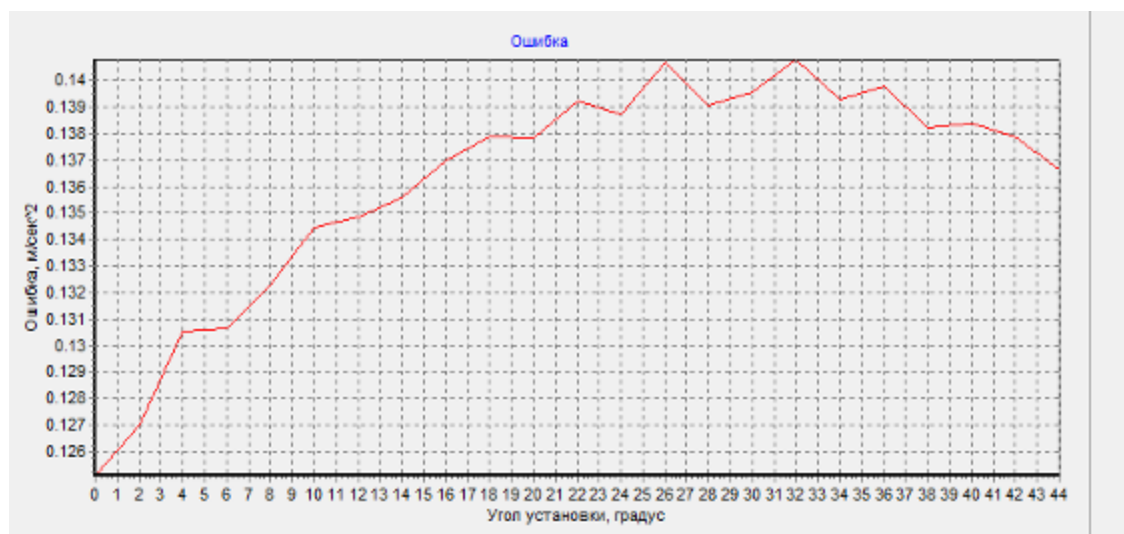


Рис. 8. - Зависимость абсолютной ошибки канала A_z MPU6050 от угла установки

Обработка данных Табл. 2 алгоритмом МНК позволило получить следующие значения параметров модели погрешности:

$$\delta M = 0.0007,$$

$$\mu_{33} = 0.0055,$$

$$\mu_{34} = 0.0002,$$

$$\Delta a_z = 0.027 \text{ м/сек}^2.$$

Ненулевое значение μ_{34} показывает присутствующую паразитную составляющую ускорений по каналу Y.

Заключение

В результате работы были рассмотрены характер и источники ошибок МЭМС акселерометров, разработана пригодная для практики модель ошибок. Для определения параметров данной модели были разработаны аппаратные и программные инструментальные средства экспериментального исследования погрешностей акселерометров. Аппаратные средства позволяют задавать нагрузку по различным осям исследуемого

акселерометра в диапазоне от $-g$ до g , в комбинации с переменным ускорением с амплитудой до $0.5 g$ в диапазоне частот от 20 до 800 Гц.

Исследуемый акселерометр помещен в малогабаритную термокамеру, позволяющую создавать температуру на измерительном столе от -30 до $+75$ градусов Цельсия. С помощью разработанных средств было проведено тестовое определение параметров упрощенной модели МЭМС акселерометра MPU 6050 по каналу a_z при фиксированной температуре измерительного стола. Разработанные средства позволяют начать систематическое исследование и объективное сравнение характеристик МЭМС акселерометров различных фирм, а также получить их рабочие модели погрешностей, пригодные для применения в алгоритмах фильтрации при построении различных систем инерциальной навигации и угловой стабилизации объектов.

Литература

1. Тимошенко С.П., Кульчицкий А.П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Известия вузов. Электроника. 2012. №6. С. 51-56.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
3. Горбунов А.А., Горбунова Е.Б. К вопросу об особенностях систем управления БПЛА с машущим крылом // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1816.
4. Lysenko I. E., Ezhova O. A., Tkachenko A.V., Naumenko D. V., Guha K., Rao K. S. Analysis of the micromechanical three-axis accelerometer // Book of Abstracts of 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint Petersburg OPEN 2019). St. Petersburg: St. Petersburg Academic University, 2019. pp. 542-543.

5. Парфенов Н.М., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С. Исследование и разработка интегральных МЭМСпреобразователей механических величин // Нано- и микросистемная техника. 2015. №5. С.49-54.

6. Соколов С.В., Погорелов В.А. Стохастическая оценка, управление и идентификация в высокоточных навигационных системах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 264с. ISBN 978-5-9221-1672-5.

7. Распопов В.Я., Малютин Д.М., Иванов Ю.В., Грязин Д.Г. Система ориентации на микромеханических акселерометрах // Нано- и микросистемная техника. 2014. №9. С.52-56.

8. Benmoussa N., Benichou A., Ghaffour K., Benyoucef B. Design and modeling of a three-axis piezoresistive microelectronic accelerometer // Physics Procedia. 2014. № 55. pp. 106 – 112.

9. Лысенко И.Е. Моделирование интегрированного внутреннего упругого подвеса микромеханического устройства // Инженерный вестник Дона, 2010, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/223.

10. Лысенко И.Е. Моделирование двухосевого микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа // Инженерный вестник Дона, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.

11. Щербань И.В., Толмачев С.А., Конев Д.С. Слабосвязанный алгоритм интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы транспортного средства // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1821.

12. Ломакин М.А. Особенности построения модели погрешности МЭМС-датчиков при решении навигационной задачи // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398.

13. Yoon S.W., Lee S., Najafi K. Vibration-induced errors in MEMS tuning fork gyroscopes // Sensors and Actuators A: Physical. 2012. №180. pp.32-44.



References

1. Timoshenkov S.P., Kul'chitskiy A.P. Izvestiya vuzov. Elektronika. 2012. №6. pp. 51-56.
 2. Raspopov V.YA. Mikromekhanicheskiye pribory: uchebnoye posobiye [Micromechanical devices: a tutorial]. M.: Mashinostroyeniye, 2007. 400 p.
 3. Gorbunov A.A., Gorbunova Ye.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1816.
 4. Lysenko I. E., Ezhova O. A., Tkachenko A.V., Naumenko D. V., Guha K., Rao K. S. Book of Abstracts of 6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint Petersburg OPEN 2019). St. Petersburg: St. Petersburg Academic University, 2019. P. 542-543.
 5. Parfenov N.M., Timoshenkov S.P., Timoshenkov A.S. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2015. №5. Pp.49-54.
 6. Sokolov S.V., Pogorelov V.A. Stokhasticheskaya otsenka, upravleniye i identifikatsiya v vysokotochnykh navigatsionnykh sistemakh [tochastic estimation, control and identification in high-precision navigation systems]. M.: FIZMATLIT, 2016. 264p.
 7. Raspopov V.YA., Malyutin D.M., Ivanov YU.V., Gryazin D.G. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2014. №9. pp.52-56.
 8. Benmoussa N., Benichou A., Ghaffour K., Benyoucef B. Physics Procedia. 2014. № 55. pp. 106 – 112.
 9. Lysenko I.Ye. Inzhenernyj vestnik Dona, 2010, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2010/223.
 10. Lysenko I.Ye. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1549.
 11. Shcherban' I.V., Tolmachev S.A., Konev D.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1821.
-



12. Lomakin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2398.

13. Yoon S.W., Lee S., Najafi K. Sensors and Actuators A: Physical. 2012. №180. pp.32-44.