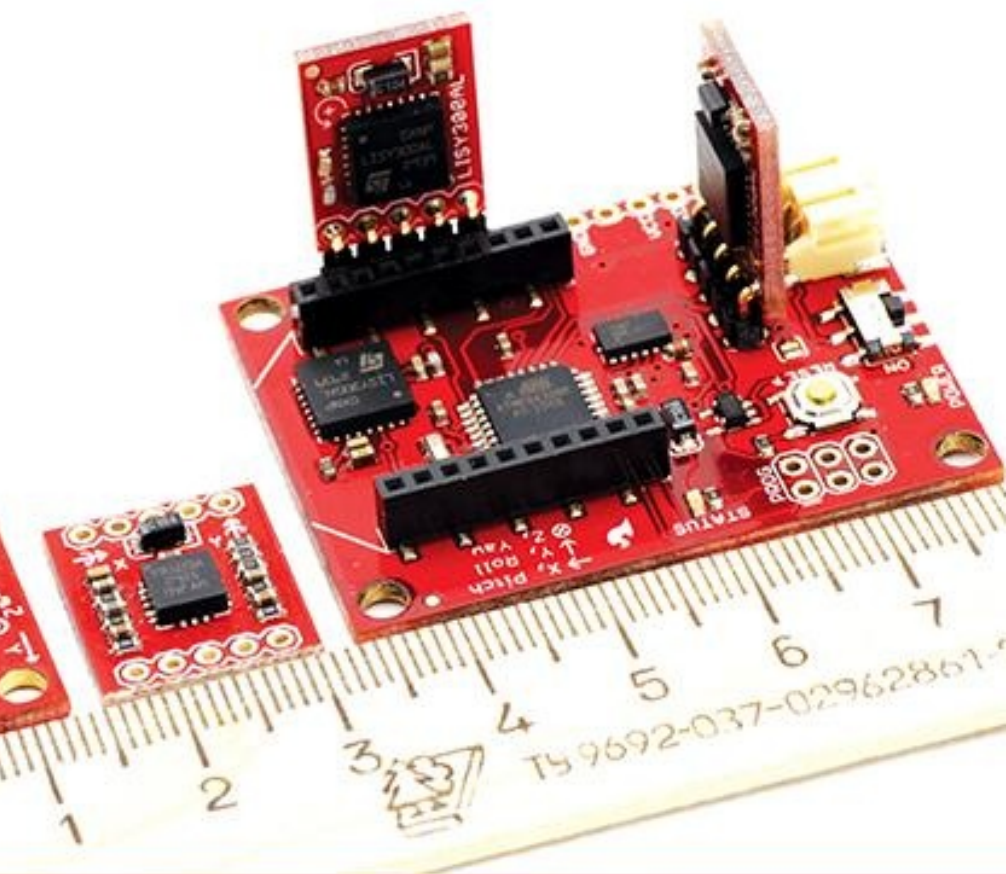


Г.В. Попов

Микромеханические инерциальные датчики



Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Г.В. Попов

Микромеханические инерциальные датчики

Лабораторный практикум



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 5

УДК 629.7.05

ББК 22.213

П58

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/177/book1377.html>

Факультет «Информатика и системы управления»
Кафедра «Приборы и системы ориентации, стабилизации
и навигации»

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия*

Попов, Г. В.

П58 Микромеханические инерциальные датчики : лабораторный практикум / Г. В. Попов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 269, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4336-9

С единых позиций изложены вопросы, связанные с моделями погрешностей, измерением параметров и калибровкой микромеханических инерциальных датчиков — акселерометров, датчиков угловой скорости, инерциальных измерительных блоков. Экспериментальная часть содержит методические указания к выполнению 12 лабораторных работ. Приведены сведения об используемом контрольно-испытательном оборудовании: развязанном основании, горизонтируемом основании, жидкостном уровне, ориентационном приспособлении, скоростном поворотном стенде с вертикальной осью вращения, цифровом мультиметре, персональном компьютере и специально разработанных пультах.

Для студентов приборостроительных специальностей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 629.7.05

ББК 22.213

ISBN 978-5-7038-4336-9

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

© Оформление. Издательство

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Предисловие

В последнее время широкое распространение получили микромеханические инерциальные датчики (MEMS — MicroElectro-Mechanical Systems) и построенные на их основе навигационные системы [1–6].

В соответствии с требованиями времени на кафедре «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана (заведующий кафедрой д-р техн. наук, профессор С.Ф. Коновалов) и на Приборостроительном факультете МГТУ им. Н.Э. Баумана (декан канд. техн. наук, доцент В.Н. Герди) в учебный процесс введены курсы лекций по микромеханическим гироскопам и акселерометрам. В курсах лекций рассматриваются принцип действия, устройство, выходные характеристики и технология изготовления микромеханических инерциальных датчиков. Для закрепления теоретических знаний студентов было решено создать в инициативном порядке лабораторный практикум, где с единых позиций изложить сведения о моделях погрешностей, методиках измерения параметров и калибровке микромеханических инерциальных датчиков: акселерометров, датчиков угловой скорости (ДУС) и инерциальных измерительных блоков (ИИБ) [7, 8].

Цель лабораторного практикума — подготовка специалистов к самостоятельной работе по созданию моделей погрешностей, измерению параметров и калибровке реальных современных микромеханических устройств: акселерометров, ДУС, ИИБ.

Задачи лабораторного практикума:

- дать сведения об указанных выше реальных современных микромеханических устройствах;
- показать методику составления моделей погрешностей микромеханических акселерометров, ДУС, ИИБ;
- привить практические навыки работы с микромеханическими акселерометрами, ДУС, ИИБ;

- научить методикам испытаний и методам калибровки микро-механических акселерометров, ДУС, ИИБ;
- дать сведения о составе контрольно-испытательного оборудования, целевом назначении каждого прибора и устройства, их характеристиках;
- научить приемам работы с информационно-измерительными системами, построенными на базе современной измерительной и вычислительной техники;
- ознакомить с методами обработки экспериментальных данных;
- привить навыки составления технических отчетов.

Структура лабораторного практикума выглядит следующим образом.

В первом разделе приведены краткие теоретические сведения об акселерометрах, моделях погрешностей, возможных способах калибровки. Дано описание объекта испытаний — трехосного микромеханического акселерометра, схема экспериментальной установки. В четырех лабораторных работах этого раздела изложены методические указания об измерении параметров и калибровке трехосного микромеханического акселерометра.

Второй раздел практикума содержит краткие теоретические сведения о ДУС, моделях погрешностей, возможных способах калибровки, описание объекта испытаний — двухосного микромеханического ДУС и схему лабораторной установки, а также пять лабораторных работ, в которых даны методические указания об измерении параметров и калибровке микромеханического ДУС.

В третий раздел на основании материала, изложенного в предыдущих разделах, включены формулы, используемые для калибровки ИИБ с цифровым выходом, дано описание объекта испытаний — ИИБ с тремя акселерометрами и тремя ДУС, а также три лабораторные работы, которые содержат методические указания об измерении параметров и калибровке микромеханического ИИБ.

В четвертом разделе приведены сведения о применяемом контрольно-испытательном оборудовании: развязанном основании, горизонтируемом основании, жидкостном уровне, ориентационном приспособлении, скоростном поворотном столе с вертикальной осью вращения, цифровом мультиметре, персональном ком-

пьютере и специально разработанных пультах «АК-Микро» и «ДУС-Микро».

В приложении 1 приведены общие требования к содержанию отчетов о лабораторных работах, а в приложении 2 — основные термины.

После выполнения лабораторного практикума студент должен:

- знать устройство, принцип действия, режимы работы, основные характеристики микромеханического трехосного акселерометра, микромеханического двухосного ДУС, микромеханического ИИБ;

- уметь рассчитывать выходные характеристики микромеханического трехосного акселерометра и микромеханического двухосного ДУС;

- знать устройство, принцип действия, режимы работы, основные характеристики входящих в ИИБ компонентов: микромеханического трехосного акселерометра, микромеханического одноосного ДУС, микроконтроллера;

- уметь назначать через экранное меню выходные характеристики ИИБ;

- знать состав контрольно-измерительной аппаратуры, применяемой в работе, целевое назначение каждого прибора и устройства, их характеристики, уметь ими пользоваться;

- владеть методикой проведения эксперимента;

- уметь обрабатывать экспериментальные данные;

- дать ответы на контрольные вопросы;

- представить отчет о лабораторных работах.

Издание данного лабораторного практикума было бы невозможно без поддержки и стимулирования со стороны заведующего кафедрой ИУ-2 «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана д-ра техн. наук, профессора С.Ф. Коновалова и декана Приборостроительного факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана канд. техн. наук, доцента В.Н. Герди.

Автор выражает также признательность студентам кафедры ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, членам гироскопического кружка кафедры ИУ-2 Д. Токареву, С. Югаю, В. Чулкову, а также студентам кафедры ИУ-2 и студентам Приборостроительного факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана Д. Колыхаеву, Т. Репиной, А. Саповскому, И. Тарасову, О. Перлиной, которые в рамках курсового и

дипломного проектирования задокументировали конструкторские решения и опробовали методики испытаний микромеханических датчиков.

Особая благодарность заведующему кафедрой ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана д-ру техн. наук, профессору С.Ф. Коновалову, канд. техн. наук, доценту кафедры ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана Л.М. Селивановой и главному научному сотруднику отдела подготовки кадров ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» «НИИ прикладной механики им. акад. В.И. Кузнецова» В.Н. Никандрову, которые ознакомились с рукописью настоящей работы, за полезные замечания и советы.

В издании принята нумерация рисунков, формул и таблиц по разделам.

Введение

В результате анализа рынка микромеханических датчиков для экономии времени и средств в качестве материальной основы лабораторного практикума было решено взять три серийных устройства (рис. В1), разработанных и изготовленных фирмой Sparkfun Electronics, Inc (США) для технического творчества молодежи в области робототехники и управления движением:

- печатную плату трехосного акселерометра;
- печатную плату двухосного ДУС;
- печатную плату ИИБ с устройствами беспроводной связи с персональным компьютером.

Зарубежные производители обычно не предоставляют пользователям информацию об устройстве и конструкции своей продук-

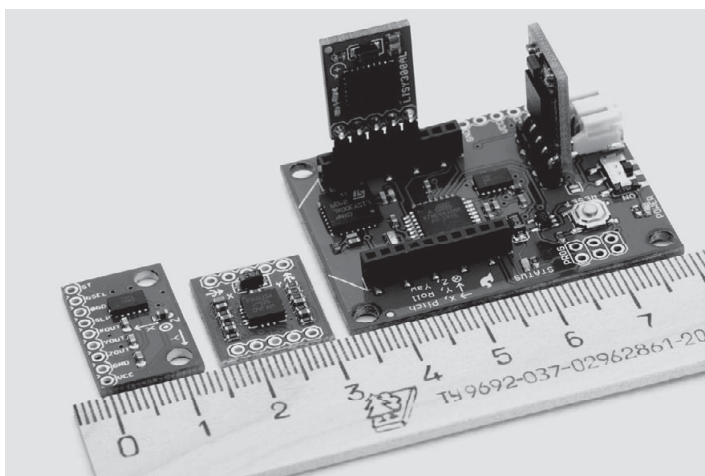


Рис. В1. Объекты испытаний в состоянии поставки (слева направо: печатная плата трехосного акселерометра, печатная плата двухосного ДУС, печатная плата ИИБ)

ции. Информационные материалы (datasheet) включают сведения об эксплуатационных характеристиках инерциальных датчиков и указания по их применению. Для того чтобы донести до студентов полезную информацию об устройстве и конструкции датчиков, фрагменты переводов информационных материалов приведены в соответствующих разделах лабораторного практикума. Обнаруженные ошибки и неточности, которые содержатся в зарубежных информационных материалах, исправлены в документах, хранящихся на кафедре ИУ-2 «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В состав контрольно-испытательного оборудования в основном входят устройства и приспособления, которые имеются на любом гироскопическом предприятии или учебной кафедре соответствующего профиля: горизонтируемое основание, жидкостный уровень, ориентационное приспособление, скоростной поворотный стенд с вертикальной осью вращения, персональный компьютер. Однако для работ с платой микромеханического трехосного акселерометра и платой микромеханического двухосного ДУС были созданы специальные пульта. Они связаны с платами акселерометра и ДУС соответствующими кабелями. Электрические схемы и конструкция обоих пультов унифицированы.

Сбор, регистрация и накопление экспериментальных данных осуществляются посредством современной измерительной и вычислительной техники. Используется готовое программное обеспечение, поставляемое вместе с цифровым мультиметром и ИИБ. Камеральная обработка накопленных экспериментальных данных может проводиться посредством любых существующих пакетов программного обеспечения с элементарной статистикой.

Терминология по гироскопии приведена в соответствие со сборником [9]. В приложении 2 приведены основные термины.

Предложенные методики испытаний микромеханических инерциальных датчиков не претендуют на новизну. Не ставилась также задача минимизации объема испытаний и оптимизации испытаний по времени, что бывает актуально при построении алгоритмов предстартовой подготовки. Основными критериями для выбора методик испытаний были стремление к единообразию, простоте и желание получить максимальный отклик объекта испытаний от приложения тех или иных тестовых воздействий.

1. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ТРЕХОСНЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

1.1. Краткие теоретические сведения

Акселерометр измеряет проекцию кажущегося ускорения на его ось чувствительности [10]:

$$\vec{a} = \vec{w} - \vec{j},$$

где \vec{a} — вектор кажущегося ускорения; \vec{w} — вектор абсолютного ускорения в центре масс чувствительного элемента акселерометра; \vec{j} — вектор силы тяготения в центре масс чувствительного элемента акселерометра.

Основные параметры и характеристики акселерометров

Акселерометры характеризуются следующим набором параметров и характеристик:

- назначение и область применения;
- конструктивная схема;
- характер зависимости между измеряемым ускорением и выходным сигналом (мгновенное значение, приращение интеграла кажущегося ускорения, первый и/или второй интеграл кажущегося ускорения);
 - форма представления выходной информации: в аналоговом виде (постоянное напряжение или постоянный ток) или в цифровом коде;
 - количество измерительных осей (одна, две или три);
 - масса;
 - габариты;
 - режимы работы;
 - напряжение (или напряжения) питания и потребляемый ток в указанных режимах работы;
 - время готовности;

- предельное значение измеряемого ускорения;
- вид выходной характеристики (в нашем случае выходная характеристика акселерометра номинально линейна);
 - крутизна выходной характеристики (масштабный коэффициент);
 - смещение нуля;
 - постоянная погрешность в данном запуске;
 - воспроизводимость или повторяемость постоянной погрешности от запуска к запуску;
 - нелинейность выходной характеристики;
 - тренд;
 - случайная погрешность;
 - частотный диапазон измеряемых ускорений (полоса пропускания);
 - погрешность выставки оси (или осей) чувствительности к посадочным поверхностям на корпусе акселерометра;
 - влияние внешних воздействий (времени, температуры, напряжения питания, линейных ускорений, ударов, вибрации, постоянного и переменного внешнего магнитного поля и т. д.) на указанные характеристики;
 - показатели надежности;
 - цена.

Основные погрешности акселерометров

Большинство параметров акселерометра определяют при испытаниях на развязанном основании, исключаящем по возможности колебания и наклоны пола и стен лаборатории.

В качестве априорной информации используют фактически измеренное или рассчитанное значение ускорения силы тяжести в месте проведения испытаний.

Акселерометру придают разные ориентации относительно отвесной линии. Измеренные значения выходного сигнала соотносят с ускорением силы тяжести.

Значение ускорения силы тяжести в месте проведения испытаний на уровне земного сфероида (уровне моря) можно рассчитать по одной из известных формул ускорения нормальной силы тяжести, например, по формуле Гельмера:

$$g(\varphi) = 9,78030(1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi), \quad (1.1)$$

где $g(\varphi)$ — ускорение силы тяжести, м/с^2 ; φ — широта места, град.

Как известно, ускорение тяготения Земли вблизи ее поверхности убывает пропорционально увеличению высоты с коэффициентом пропорциональности, равным удвоенному квадрату частоты Шулера [10]:

$$\Delta j = -2v^2 \Delta h, \quad (1.2)$$

где Δj — изменение ускорения тяготения Земли, м/с^2 ; v — частота Шулера, $1/\text{с}$; Δh — приращение высоты над уровнем земного сфероида, м.

При изменении высоты вблизи поверхности Земли изменение силы тяготения происходит по формуле

$$\Delta j = -3,076 \cdot 10^{-6} \Delta h. \quad (1.3)$$

В соответствии с формулой (1.3) подъем на высоту 100 м над уровнем моря приводит к уменьшению ускорения тяготения на $3,076 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$.

В лабораторном практикуме используется расчетное значение ускорения нормальной силы тяжести (см. (1.1)) в месте проведения испытаний с учетом поправки на высоту (см. (1.3)):

$$g(\varphi, \Delta h) = g(\varphi) + \Delta j. \quad (1.4)$$

При наличии постоянного смещения нуля акселерометра a_0 и малой погрешности выставки оси чувствительности акселерометра относительно посадочной базы на его корпусе β показания акселерометра, установленного на горизонтальном основании, будут одинаковы независимо от ориентации оси чувствительности акселерометра (рис. 1.1).

При наличии постоянного смещения нуля акселерометра a_0 и малой погрешности выставки оси чувствительности акселерометра относительно посадочной базы на его корпусе β показания акселерометра при его установке на горизонтальную поверхность сверху и снизу (рис. 1.2) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 U_0^H &= K_A(a_0 + g\beta); \\
 U_{180}^H &= K_A(a_0 - g\beta),
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

где U_0^H, U_{180}^H — выходные напряжения акселерометра при его установке на горизонтальное основание сверху и снизу, мВ; K_A — номинальный масштабный коэффициент акселерометра, мВ/(м/с²); a_0 — постоянное смещение акселерометра, м/с²; β — малая погрешность выставки оси чувствительности акселерометра относительно посадочной базы на его корпусе, б/р.

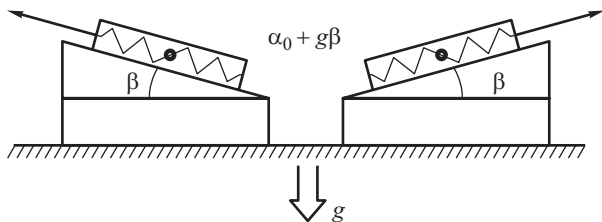


Рис. 1.1. Акселерометр со смещением нуля на горизонтальном основании

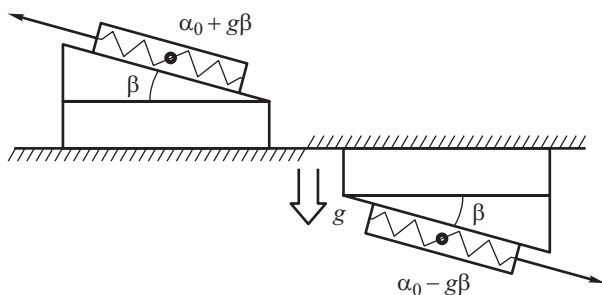


Рис. 1.2. Акселерометр со смещением нуля, установленный на горизонтальное основание сверху и снизу

Полусумма показаний акселерометра (1.5) при его установке на горизонтальное основание сверху и снизу дает возможность определить смещение нуля акселерометра

$$a_0 = \frac{1}{2} \frac{U_0^H + U_{180}^H}{K_A},
 \tag{1.6}$$

а полуразность — погрешность выставки оси чувствительности акселерометра относительно посадочной базы на его корпусе

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{U_0^H - U_{180}^H}{K_A g}. \quad (1.7)$$

При наличии постоянного смещения нуля акселерометра a_0 и малой погрешности выставки оси чувствительности акселерометра относительно посадочной базы на его корпусе β при его установке на основание, имеющее малый угол отклонения γ относительно отвесной линии (рис. 1.3), показания акселерометра в двух противоположных положениях оси чувствительности акселерометра можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} U_0^V &= K_A [a_0 + g \cos(\beta + \gamma)]; \\ U_{180}^V &= K_A [a_0 - g \cos(\beta - \gamma)], \end{aligned} \quad (1.8)$$

где U_0^V, U_{180}^V — показания акселерометра в двух противоположных положениях на номинально вертикальном основании, мВ; γ — малый угол отклонения основания от отвесной линии, б/р.

В случае малых углов β и γ

$$\begin{aligned} U_0^V &= K_A (a_0 + g); \\ U_{180}^V &= K_A (a_0 - g). \end{aligned} \quad (1.9)$$

Тогда полусумма показаний акселерометра в двух противоположных направлениях вблизи отвесной линии дает возможность определить смещение нуля акселерометра

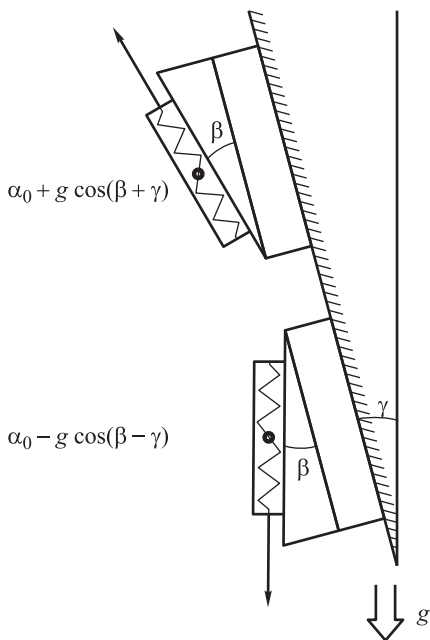


Рис. 1.3. Акселерометр со смещением нуля на неvertикальном основании

$$a_0 = \frac{1}{2} \frac{U_0^V + U_{180}^V}{K_A}, \quad (1.10)$$

а полуразность показаний акселерометра в двух противоположных направлениях вблизи отвесной линии дает возможность определить масштабный коэффициент акселерометра

$$K_A = \frac{1}{2} \frac{U_0^V - U_{180}^V}{g} \quad (1.11)$$

в предположении линейности характеристики акселерометра в диапазоне ускорений от минус $1g$ до $1g$.

Линейная модель погрешности триады акселерометров

Наиболее употребительной моделью погрешности является модель степенной зависимости погрешности от проекций вектора кажущегося ускорения основания. При малых ускорениях основания в модели погрешности можно ограничиться первой степенью проекций кажущегося ускорения. Простейшая линейная модель погрешности триады акселерометров, т. е. трех акселерометров с номинально ортогональными входными осями, может быть получена из следующих соображений.

Введем систему координат $0XYZ$ (рис. 1.4). Входные оси каждого из трех акселерометров совпадают с осями системы координат $0XYZ$. При проведении лабораторного практикума система координат $0XYZ$ материализуется в виде ориентационного приспособления (куба с ортогональными гранями — трехгранника), описанного в подразд. 4.4. Оси системы координат $0XYZ$ ортогональны и параллельны соответствующим граням ориентационного приспособления.

Обозначим проекции кажущегося ускорения на оси системы координат $0XYZ$ так: a_x, a_y, a_z .

В случае малых относительных погрешностей масштабного коэффициента A_{xx}, A_{yy}, A_{zz} каждый акселерометр измеряет проекцию кажущегося ускорения на свою ось чувствительности с соответствующими погрешностями: $(1 + A_{xx})a_x$; $(1 + A_{yy})a_y$; $(1 + A_{zz})a_z$.

При наличии малых погрешностей выставки осей чувствительности (см. рис. 1.4) каждый акселерометр дополнительно из-

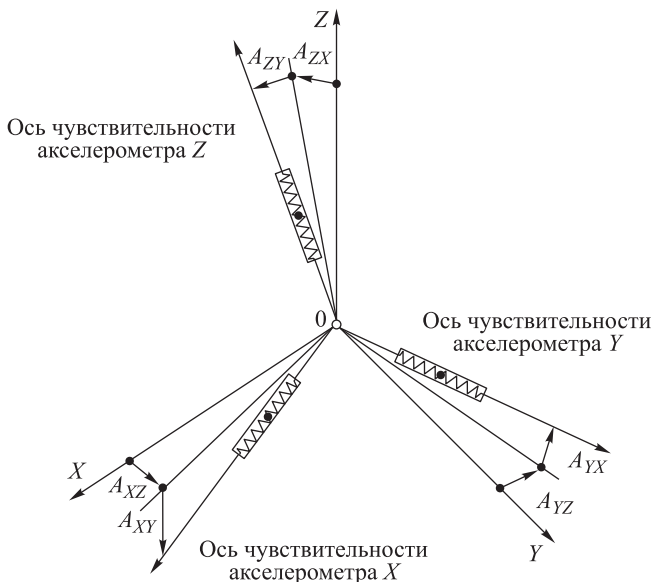


Рис. 1.4. К модели погрешности триады акселерометров

меряет кажущиеся ускорения вдоль двух других осей системы координат $0XYZ$.

По оси чувствительности акселерометра X имеем дополнительно проекции кажущегося ускорения $A_{XZ}a_Y$ и $(-A_{XY}a_Z)$; по оси чувствительности акселерометра Y — проекции $(-A_{YZ}a_X)$ и $A_{YX}a_Z$; по оси чувствительности акселерометра Z — проекции $A_{ZY}a_X$ и $(-A_{ZX}a_Y)$.

Каждый акселерометр имеет свое смещение нуля — a_{0X} , a_{0Y} , a_{0Z} , в общем случае зависящее от времени, температуры и других внешних условий, а также свою случайную составляющую погрешности — $\xi_{AX}(t)$, $\xi_{AY}(t)$, $\xi_{AZ}(t)$.

Схемотехника микромеханических инерциальных датчиков обычно такова, что их выходная характеристика смещена на некоторую известную расчетную величину. В нашем случае выходная характеристика каждого канала акселерометра смещена соответственно на величину U_{0AX} , U_{0AY} , U_{0AZ} , в нашем случае равную половине напряжения питания акселерометра.

Таким образом, модель погрешности триады акселерометров можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 U_{AX} &= \\
 &= K_{AX} [(1 + A_{XX})a_X + A_{XZ}a_Y - A_{XY}a_Z + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\
 U_{AY} &= \\
 &= K_{AY} [-A_{YZ}a_X + (1 + A_{YY})a_Y + A_{YX}a_Z + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\
 U_{AZ} &= \\
 &= K_{AZ} [A_{ZY}a_X - A_{ZX}a_Y + (1 + A_{ZZ})a_Z + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ},
 \end{aligned} \tag{1.12}$$

или в матричной форме

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} U_{AX} \\ U_{AY} \\ U_{AZ} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{AX} \\ K_{AY} \\ K_{AZ} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} (1 + A_{XX}) & A_{XZ} & -A_{XY} \\ -A_{YZ} & (1 + A_{YY}) & A_{YX} \\ A_{ZY} & -A_{ZX} & (1 + A_{ZZ}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} \right) + \\
 &+ \begin{bmatrix} a_{0X} \\ a_{0Y} \\ a_{0Z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{AX}(t) \\ \xi_{AY}(t) \\ \xi_{AZ}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{0AX} \\ U_{0AY} \\ U_{0AZ} \end{bmatrix},
 \end{aligned} \tag{1.13}$$

где K_{AX}, K_{AY}, K_{AZ} — номинальные значения масштабных коэффициентов по соответствующим осям.

Калибровка триады акселерометров

Калибровку в силу приведенной в виде (1.12) модели погрешности выполняют путем измерения показаний каждого из трех акселерометров при их различных угловых положениях относительно отвесной линии.

В гироскопических системах с кардановым подвесом платформы конструкция прибора является испытательным стендом, поскольку позволяет осуществлять выставку платформы в разные угловые положения, именуемые также ориентациями, посредством датчиков команд (датчиков крена, тангажа (дифферента), азимута) и соответствующих следящих систем. В бескарданных системах

калибровку выполняют на наклонно-поворотных стендах и/или оптических делительных головках. Во время проведения данного лабораторного практикума установку в разные ориентации триады акселерометров, закрепленной на ориентационном приспособлении (кубе с взаимно ортогональными установочными плоскостями), выполняют вручную на предварительно выставленном в горизонте основании.

Выставим ось X ориентационного приспособления по направлению отвесной линии вверх в **ориентацию 1**. Тогда выражения для тестовых воздействий примут вид

$$\begin{aligned} a_X &= g; \\ a_Y &= a_Z = 0. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Подставив выражения для тестовых воздействий (1.14) в формулы (1.12), получим

$$\begin{aligned} U_{AX}(1) &= K_{AX} [(1 + A_{XX})g + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\ U_{AY}(1) &= K_{AY} [-A_{YZ}g + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\ U_{AZ}(1) &= K_{AZ} [A_{ZY}g + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Выставим ось X ориентационного приспособления по направлению отвесной линии вниз в **ориентацию 2**. Тогда выражения (1.14) для тестовых воздействий примут вид

$$\begin{aligned} a_X &= -g; \\ a_Y &= a_Z = 0. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Подставив выражения для тестовых воздействий (1.16) в формулы (1.12), получим

$$\begin{aligned} U_{AX}(2) &= K_{AX} [-(1 + A_{XX})g + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\ U_{AY}(2) &= K_{AY} [A_{YZ}g + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\ U_{AZ}(2) &= K_{AZ} [-A_{ZY}g + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

После осреднения показаний акселерометров, приведенных в формулах (1.15) и (1.17), имеем

$$\begin{aligned}
\bar{U}_{AX}(1) &= K_{AX} [(1 + A_{XX})g + a_{0X}] + U_{0AX}; \\
\bar{U}_{AY}(1) &= K_{AY} [-A_{YZ}g + a_{0Y}] + U_{0AY}; \\
\bar{U}_{AZ}(1) &= K_{AZ} [A_{ZY}g + a_{0Z}] + U_{0AZ}; \\
\bar{U}_{AX}(2) &= K_{AX} [-(1 + A_{XX})g + a_{0X}] + U_{0AX}; \\
\bar{U}_{AY}(2) &= K_{AY} [A_{YZ}g + a_{0Y}] + U_{0AY}; \\
\bar{U}_{AZ}(2) &= K_{AZ} [-A_{ZY}g + a_{0Z}] + U_{0AZ}.
\end{aligned} \tag{1.18}$$

Вычисление соответствующих полусумм и полуразностей средних значений показаний акселерометров (см. (1.18)) в ориентациях 1 и 2 дает возможность определить ряд калибровочных констант триады акселерометров:

$$\begin{aligned}
A_{XX} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(1) - \bar{U}_{AX}(2)}{K_{AX}g} - 1; \\
a_{0X} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(1) + \bar{U}_{AX}(2) - 2U_{0AX}}{K_{AX}}; \\
A_{YZ} &= -\frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(1) - \bar{U}_{AY}(2)}{K_{AY}g}; \\
a_{0Y} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(1) + \bar{U}_{AY}(2) - 2U_{0AY}}{K_{AY}}; \\
A_{ZY} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(1) - \bar{U}_{AZ}(2)}{K_{AZ}g}; \\
a_{0Z} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(1) + \bar{U}_{AZ}(2) - 2U_{0AZ}}{K_{AZ}}.
\end{aligned} \tag{1.19}$$

Выставим ось Y ориентационного приспособления по направлению отвесной линии вверх в **ориентацию 3**. Тогда выражения для тестовых воздействий примут вид

$$\begin{aligned} a_Y &= g; \\ a_X &= a_Z = 0. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Подставив выражения для тестовых воздействий (1.20) в формулы (1.12), получим

$$\begin{aligned} U_{AX}(3) &= K_{AX} [A_{XZ}g + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\ U_{AY}(3) &= K_{AY} [(1 + A_{YY})g + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\ U_{AZ}(3) &= K_{AZ} [-A_{ZX}g + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.21)$$

Выставим ось Y ориентационного приспособления по направлению отвесной линии вниз в **ориентацию 4**. Тогда выражения (1.20) для тестовых воздействий примут вид

$$\begin{aligned} a_Y &= -g; \\ a_X &= a_Z = 0. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Подставив выражения для тестовых воздействий (1.22) в формулы (1.12), получим

$$\begin{aligned} U_{AX}(4) &= K_{AX} [-A_{XZ}g + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\ U_{AY}(4) &= K_{AY} [-(1 + A_{YY})g + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\ U_{AZ}(4) &= K_{AZ} [A_{ZX}g + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

После осреднения показаний акселерометров, приведенных в формулах (1.21) и (1.23), получим

$$\begin{aligned} \bar{U}_{AX}(3) &= K_{AX} [A_{XZ}g + a_{0X}] + U_{0AX}; \\ \bar{U}_{AY}(3) &= K_{AY} [(1 + A_{YY})g + a_{0Y}] + U_{0AY}; \\ \bar{U}_{AZ}(3) &= K_{AZ} [-A_{ZX}g + a_{0Z}] + U_{0AZ}; \\ \bar{U}_{AX}(4) &= K_{AX} [-A_{XZ}g + a_{0X}] + U_{0AX}; \\ \bar{U}_{AY}(4) &= K_{AY} [-(1 + A_{YY})g + a_{0Y}] + U_{0AY}; \\ \bar{U}_{AZ}(4) &= K_{AZ} [A_{ZX}g + a_{0Z}] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.24)$$

Вычисление соответствующих полусумм и полуразностей средних значений показаний акселерометров (см. (1.24)) в ориентациях 3 и 4 дает возможность определить ряд калибровочных констант триады акселерометров:

$$\begin{aligned}
 A_{XZ} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(3) - \bar{U}_{AX}(4)}{K_{AX}g}; \\
 a_{0X} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(3) + \bar{U}_{AX}(4) - 2U_{0AX}}{K_{AX}}; \\
 A_{YY} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(3) - \bar{U}_{AY}(4)}{K_{AY}g} - 1; \\
 a_{0Y} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(3) + \bar{U}_{AY}(4) - 2U_{0AY}}{K_{AY}}; \\
 A_{ZX} &= -\frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(3) - \bar{U}_{AZ}(4)}{K_{AZ}g}; \\
 a_{0Z} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(3) + \bar{U}_{AZ}(4) - 2U_{0AZ}}{K_{AZ}}.
 \end{aligned} \tag{1.25}$$

Выставим ось Z ориентационного приспособления по направлению отвесной линии вверх в **ориентацию 5**. Тогда выражения для тестовых воздействий примут вид

$$\begin{aligned}
 a_Z &= g; \\
 a_X &= a_Y = 0.
 \end{aligned} \tag{1.26}$$

Подставив выражения для тестовых воздействий (1.26) в формулы (1.12), получим

$$\begin{aligned}
 U_{AX}(5) &= K_{AX} [-A_{XY}g + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\
 U_{AY}(5) &= K_{AY} [A_{YX}g + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\
 U_{AZ}(5) &= K_{AZ} [(1 + A_{ZZ})g + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ}.
 \end{aligned} \tag{1.27}$$

Выставим ось Z ориентационного приспособления по направлению отвесной линии вниз в **ориентацию 6**. Тогда выражения для тестовых воздействий примут вид

$$\begin{aligned} a_Z &= -g; \\ a_X &= a_Y = 0. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Подставив выражения для тестовых воздействий (1.28) в формулы (1.12), получим

$$\begin{aligned} U_{AX}(6) &= K_{AX} [A_{XY}g + a_{0X} + \xi_{AX}(t)] + U_{0AX}; \\ U_{AY}(6) &= K_{AY} [-A_{YX}g + a_{0Y} + \xi_{AY}(t)] + U_{0AY}; \\ U_{AZ}(6) &= K_{AZ} [-(1 + A_{ZZ})g + a_{0Z} + \xi_{AZ}(t)] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.29)$$

После осреднения показаний акселерометров, приведенных в формулах (1.27) и (1.29), имеем

$$\begin{aligned} \bar{U}_{AX}(5) &= K_{AX} [-A_{XY}g + a_{0X}] + U_{0AX}; \\ \bar{U}_{AY}(5) &= K_{AY} [A_{YX}g + a_{0Y}] + U_{0AY}; \\ \bar{U}_{AZ}(5) &= K_{AZ} [(1 + A_{ZZ})g + a_{0Z}] + U_{0AZ}; \\ \bar{U}_{AX}(6) &= K_{AX} [A_{XY}g + a_{0X}] + U_{0AX}; \\ \bar{U}_{AY}(6) &= K_{AY} [-A_{YX}g + a_{0Y}] + U_{0AY}; \\ \bar{U}_{AZ}(6) &= K_{AZ} [-(1 + A_{ZZ})g + a_{0Z}] + U_{0AZ}. \end{aligned} \quad (1.30)$$

Вычисление соответствующих полусумм и полуразностей средних значений показаний акселерометров, входящих в формулы (1.30), в ориентациях 5 и 6 дает возможность определить ряд калибровочных констант триады акселерометров:

$$\begin{aligned} A_{XY} &= -\frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(5) - \bar{U}_{AX}(6)}{K_{AX}g}; \\ a_{0X} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(5) + \bar{U}_{AX}(6) - 2U_{0AX}}{K_{AX}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{YX} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(5) - \bar{U}_{AY}(6)}{K_{AY}g}; \\
a_{0Y} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(5) + \bar{U}_{AY}(6) - 2U_{0AY}}{K_{AY}}; \\
A_{ZZ} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(5) - \bar{U}_{AZ}(6)}{K_{AZ}g} - 1; \\
a_{0Z} &= \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(5) + \bar{U}_{AZ}(6) - 2U_{0AZ}}{K_{AZ}}.
\end{aligned} \tag{1.31}$$

Окончательно формулы для определения калибровочных констант триады акселерометров в силу модели погрешности в виде (1.12) могут быть получены из выражений (1.19), (1.25), (1.31):

• для поправок к масштабным коэффициентам

$$A_{XX} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(1) - \bar{U}_{AX}(2)}{K_{AX}g} - 1; \tag{1.32}$$

$$A_{YY} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(3) - \bar{U}_{AY}(4)}{K_{AY}g} - 1; \tag{1.33}$$

$$A_{ZZ} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(5) - \bar{U}_{AZ}(6)}{K_{AZ}g} - 1; \tag{1.34}$$

• для погрешности выставки оси чувствительности акселерометра X

$$A_{XZ} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(3) - \bar{U}_{AX}(4)}{K_{AX}g}; \tag{1.35}$$

$$A_{XY} = -\frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(5) - \bar{U}_{AX}(6)}{K_{AX}g}; \tag{1.36}$$

• для погрешности выставки оси чувствительности акселерометра Y

$$A_{YZ} = -\frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(1) - \bar{U}_{AY}(2)}{K_{AY}g}; \tag{1.37}$$

$$A_{YX} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(5) - \bar{U}_{AY}(6)}{K_{AY}g}; \quad (1.38)$$

• для погрешности выставки оси чувствительности акселерометра Z

$$A_{ZY} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(1) - \bar{U}_{AZ}(2)}{K_{AZ}g}; \quad (1.39)$$

$$A_{ZX} = -\frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(3) - \bar{U}_{AZ}(4)}{K_{AZ}g}; \quad (1.40)$$

• для смещения нуля акселерометра X

$$a_{0X} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(1) + \bar{U}_{AX}(2) - 2U_{0AX}}{K_{AX}}; \quad (1.41)$$

$$a_{0X} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(3) + \bar{U}_{AX}(4) - 2U_{0AX}}{K_{AX}}; \quad (1.42)$$

$$a_{0X} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AX}(5) + \bar{U}_{AX}(6) - 2U_{0AX}}{K_{AX}}; \quad (1.43)$$

• для смещения нуля акселерометра Y

$$a_{0Y} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(1) + \bar{U}_{AY}(2) - 2U_{0AY}}{K_{AY}}; \quad (1.44)$$

$$a_{0Y} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(3) + \bar{U}_{AY}(4) - 2U_{0AY}}{K_{AY}}; \quad (1.45)$$

$$a_{0Y} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AY}(5) + \bar{U}_{AY}(6) - 2U_{0AY}}{K_{AY}}; \quad (1.46)$$

• для смещения нуля акселерометра Z

$$a_{0Z} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(1) + \bar{U}_{AZ}(2) - 2U_{0AZ}}{K_{AZ}}; \quad (1.47)$$

$$a_{0Z} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(3) + \bar{U}_{AZ}(4) - 2U_{0AZ}}{K_{AZ}}; \quad (1.48)$$

$$a_{0Z} = \frac{1}{2} \frac{\bar{U}_{AZ}(5) + \bar{U}_{AZ}(6) - 2U_{0AZ}}{K_{AZ}}. \quad (1.49)$$

В формулах (1.32)–(1.49) приняты следующие обозначения: $\bar{U}_{AX}(1)$, $\bar{U}_{AX}(2)$, $\bar{U}_{AX}(3)$, $\bar{U}_{AX}(4)$, $\bar{U}_{AX}(5)$, $\bar{U}_{AX}(6)$ — средние значения показаний акселерометра X в соответствующей ориентации; $\bar{U}_{AY}(1)$, $\bar{U}_{AY}(2)$, $\bar{U}_{AY}(3)$, $\bar{U}_{AY}(4)$, $\bar{U}_{AY}(5)$, $\bar{U}_{AY}(6)$ — средние значения показаний акселерометра Y в соответствующей ориентации; $\bar{U}_{AZ}(1)$, $\bar{U}_{AZ}(2)$, $\bar{U}_{AZ}(3)$, $\bar{U}_{AZ}(4)$, $\bar{U}_{AZ}(5)$, $\bar{U}_{AZ}(6)$ — средние значения показаний акселерометра Z в соответствующей ориентации; U_{0AX} , U_{0AY} , U_{0AZ} — смещения выходной характеристики каналов акселерометра.

В силу линейности принятой модели погрешности акселерометра в виде (1.12) любая полусумма значений показаний акселерометра с противоположно направленными осями чувствительности дает оценку смещения нуля. Работа в шести ориентациях позволяет получить три оценки смещения нуля каждого акселерометра. Близость значений этих трех оценок может свидетельствовать о корректности проведенной калибровки.

Следует также обратить внимание на то, что оценки смещения нуля акселерометров по формулам (1.42)–(1.44), (1.46)–(1.48) используют измерения вблизи нулевых сигналов акселерометров, а оценки смещения нуля акселерометров по формулам (1.41), (1.45), (1.49) — вблизи минус $1g$ и $1g$. Обусловленная этим обстоятельством разница в оценках смещения нуля может указывать на нелинейность выходной характеристики.

Выделенное для проведения лабораторного практикума ориентационное приспособление (куб с взаимно ортогональными гранями) имеет пять, а не шесть, рабочих граней (см. рис. 4.2 в разд. 4). Шестая грань куба используется для установки разъема и вывода электрических цепей. Отполированные стальные «пяточки», материализующие шестую грань, отсутствуют. Это означает, что ортогональность шестой грани куба не обеспечена с нужной точностью.

Поэтому при установке куба в ориентацию 6 имеет смысл проводить измерение одного только выходного напряжения акселерометра $U_{AZ}(6)$ по оси Z для определения масштабного коэффициента A_{ZZ} по формуле (1.34). Выходные напряжения двух других

акселерометров $U_{AX}(6)$ и $U_{AY}(6)$ неизбежно будут содержать произвольные углы отклонения шестой грани от ортогональности с другими гранями и не могут быть использованы для определения погрешностей выставки осей чувствительности акселерометров X и Y по формулам (1.36) и (1.38).

Однако отсутствие измерений выходных напряжений $U_{AX}(6)$ и $U_{AY}(6)$ в ориентации 6 не влияет на определение большинства калибровочных констант триады акселерометров по формулам (1.32)–(1.35), (1.37), (1.39)–(1.42), (1.44), (1.45), (1.47)–(1.49).

Недостающие формулы для вычисления погрешности выставки A_{XY} оси чувствительности акселерометра X и погрешности выставки A_{YX} оси чувствительности акселерометра Y можно получить из первой и второй формул (1.30)

$$A_{XY} = \frac{a_{0X}}{g} - \frac{\bar{U}_{AX}(5) - U_{0AX}}{K_{AX}g}; \quad (1.50)$$

$$A_{YX} = -\frac{a_{0Y}}{g} + \frac{\bar{U}_{AY}(5) - U_{0AY}}{K_{AY}g}, \quad (1.51)$$

где a_{0X} , a_{0Y} — смещения нуля акселерометров соответственно X и Y , вычисленные по формулам (1.41), (1.42) и (1.44), (1.45).

1.2. Объект исследования

Объектом исследования является плата трехосного акселерометра Triple Axis Accelerometer Breakout-MMA7361L SEN-09652 фирмы SparkFun Electronics, Inc (рис. 1.5).

На плате акселерометра размещены:

- микросхема трехосного акселерометра MMA7361L фирмы Freescale Semiconductor;
- конденсатор в цепи питания микросхемы;
- конденсаторы в выходных цепях микросхемы, определяющие полосу пропускания.

Микросхема трехосного акселерометра MMA7361L имеет следующие особенности [11]:

- габариты $3 \times 5 \times 1$ мм в стандартном корпусе LGA-14 (land grid array) (рис. 1.6);

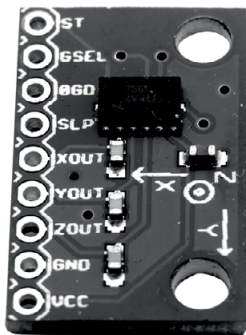


Рис. 1.5. Плата микромеханического трехосного акселерометра MMA7361L в состоянии поставки

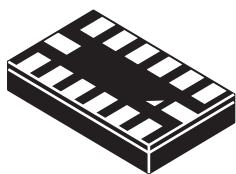


Рис. 1.6. Корпус LGA 1977-01 микросхемы акселерометра MMA7361L (вид снизу)

ней командой логического уровня, для проверки работоспособности микросхемы после транспортирования, монтажа и при эксплуатации;

- возможность выбора одного из двух диапазонов измеряемых ускорений $\pm 1,5g$ или $\pm 6g$ по внешней команде логического уровня ДИАПАЗОН 1,5G/6G (G-SELECT);

- наличие функции определения нулевого ускорения 0G (0G-DETECT) для возможной защиты оборудования, например жесткого диска персонального компьютера, при падении;

- высокое значение масштабного коэффициента 800 мВ/г в диапазоне $\pm 1,5g$;

- возможность формирования полосы пропускания внешним пассивным аналоговым фильтром нижних частот;

- низкий уровень питающего напряжения от 2,2 до 3,6 В;

- низкий потребляемый ток в рабочем режиме не более 600 мкА;

- наличие СПЯЩЕГО РЕЖИМА (SLEEP MODE), который задается внешней командой логического уровня, с потреблением тока в этом режиме не более 10 мкА;

- наличие режима САМОТЕСТИРОВАНИЕ (SELF TEST), который задается внешней командой логического уровня, для проверки работоспособности микросхемы после транспортирования, монтажа и при эксплуатации;