УДК 53.087.45

С. В. Красницкий

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

А. В. Белов

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «ИЭМ»

Полупроводниковые приборы определения ускорения, высоты, направления движения тела и температуры за бортом

Рассмотрен состав IMU (Inertial measurement unit – инерционные измерительный модуль, очень широко востребованное устройство, которое, несмотря на малый размер, способно определять важные для навигации и определения места в пространстве относительно выбранной системы координат более крупного прибора, в состав которого входит IMU). Представлены принцип его работы на примере классического кинематического инерционного датчика, преимущества полупроводникового и емкостного датчиков перед кинематическим, принцип действия полупроводникового датчика, а также приведена сравнительная характеристика трех инерционных датчиков одной компании. Рассмотрены некоторые их параметры, которые помогут сделать вывод о целесообразности объединения этих устройств в один функциональный блок (объединить все их сильные стороны и исключить определенные недостатки).

Ускорение, скорость, напряжение, конденсатор, акселерометр, датчики, гироскоп, полупроводник, частота, вибрация

Инерционные измерительные модули, или IMU - это широкий класс устройств, задача которых – научить любое более сложное устройство ориентироваться в пространстве (например, мобильный робот, квадрокоптер или любой другой подобный гаджет - методами инерционной навигации). Они хорошо подходят для целей стабилизации, наведения и навигации на промышленных, авиационных и оборонных рынках. Это важный элемент инерциальных навигационных систем в беспилотных летательных аппаратах, автономных необитаемых подводных аппаратах, автоматически управляемых тележках поездов, автоматических наземных и дистанционно управляемых аппаратах. Также IMU [1] используются для стабилизации камер и различных переносных устройств, требующих применения компактных инерциальных измерительных приборов для обеспечения деятельности при невозможности работы по GPS [1].

Цель статьи – провести анализ измерительных инерционных модулей на примере 3IMU, сделать вывод о целесообразности сведения в один функциональный блок нескольких измерительных инерционных модулей. Обычно IMU в своем составе содержит:

1. Акселерометр, который показывает направление и значение ускорения устройства, в том числе и ускорение свободного падения. Благодаря ему всегда можно определить, с какой стороны находится центр Земли и в какую сторону ускоряется устройство [1].

2. Гироскоп. С его помощью узнают угловую скорость устройства относительно собственных осей x, y и z [1].

3. Трехмерный компас. Он указывает на север независимо от того, в каком положении находится устройство [1].

4. Барометр. С помощью показаний этого прибора вычисляются абсолютное давление, высота над уровнем моря и температура за бортом (корпусом) [1].

Рассмотрим принцип действия классического прямолинейного датчика кинематических величин с несколькими направленными инерционными элементами [2].

На рис. 1, *а* представлена схема датчика, который имеет в своем составе два инерционных элемента (ИЭ), массы которых принимаются за



 m_1 и m_2 . К корпусу датчика привяжем прямоугольные системы координат *Охуг* и ξηζ. Ось *Ог* – назначаемая измерительная ось датчика или ось, определяемая конструкцией датчика. Вдоль оси *Ог* направлены необходимые измеряемые компоненты векторной величины и вектор основной чувствительности датчика. Направленные свойства датчика определяются тем, что все инерционные элементы находятся на упругом подвесе и могут совершать только поступательные перемещения относительно оси ζ.

Пусть ось ζ не совпадает с измеряемой осью *Oz*, что вызвано дефектом изготовления датчика (такие датчики следует использовать для измерения низкочастотной вибрации); c_1 , c_2 , c_3 – упругие подвесы; $\delta_1(t)$, $\delta_2(t)$ – обобщенные координаты перемещения центров масс; W_3 – абсолютное ускорение точки Земли, в которой расположено начало координат O_1 .

При отсутствии внешних сил точки 1 и 2, положение которых не меняется относительно корпуса самого датчика, совпадают с точками 3 и 4 центров масс инерционных элементов (положение ИЭ на рис. 1, *a* – упругоинерционная измерительная система прямолинейного датчика с двумя направленными инерционным и элементами) [3]. В общем случае центры масс могут не лежать на оси ζ . Предусматривается, что сам датчик установлен непосредственно на некотором теле и трехгранник $\xi\eta\zeta$, перемещаясь вместе с телом, вращается с абсолютной угловой скоростью Ω ; ξ_0 , ζ_0 , η_0 – единичные векторы соответствующих осей:

$$\Omega = \Omega_{\xi} \xi_0 + \Omega_{\eta} \eta_0 + \Omega_{\zeta} \zeta_0.$$

Произвольное положение указанных выше точек в произвольный момент времени задано радиус-вектором r_i (*i* – номер точки), проведенным из начала O_1 некоторой системы координат, расположенной на поверхности Земли и, следовательно, не являющейся инерциальной [3].

На рис. 1, б (NS – ось вращения Земли) показано расположение этой системы координат относительно Земли и ее центра, обозначенного точкой А. Приняв центр Земли за точку инерциальной системы отсчета, для указанных радиус-векторов можно записать равенство

$$r' = r + R_3,$$

где R_3 – радиус-вектор, проведенный из центра Земли в точку O_1 . Перемещение масс m_1 и m_2 относительно корпуса определяется соотношениями

$$\delta_1(t) \approx r_3(t) - r_1(t) = r'_3(t) - r'_1(t) = \delta_1(t)\xi_0;$$

$$\delta_2(t) \approx r_4(t) - r_2(t) = r'_4(t) - r'_2(t) = \delta_2(t)\xi_0.$$

Для описания работы датчика определяются кинетическая T и потенциальная U энергии измеряемой системы, диссипативная функция R [3]. При вычислении всех перечисленных переменных можно непосредственно определить положение, угол поворота, ускорение и скорость движения тела.

Датчики, работа которых основана на полупроводниковых технологиях.

Рассматриваются именно полупроводниковые и емкостные датчики, потому что они помимо гораздо меньших габаритов обладают следующими преимуществами перед кинематическими:

полупроводниковые датчики:

1) низкая стоимость благодаря массовому производству;

2) высокая воспроизводимость;

3) высокая стойкость к ударным воздействиям;

4) функциональная законченность (сенсор и схема обработки на одном кристалле).

емкостные датчики:

1) высокая линейность;

2) высокая чувствительность;

 легко осуществимые самокалибровка и самотестирование;

4) легкая реализация цепей обратной связи;

5) совместимость с КМОП-технологией;

6) широкий диапазон рабочих частот.

Рассматриваемые далее датчики-акселерометры осуществляют измерения за счет измерения смещения инерциальной массы под действием ускорения и воздействуют на тензодатчик [1]. Наблюдается аналогия с классическими кинематическими датчиками.

Рассмотрим принцип работы полупроводникового датчика. В связи с тем, что сдвиг центральной пластины очень мал в соответствии с изменением емкости порядка 10...15 Ф, лучше измерять разницу между емкостями двух конденсаторов.

На рис. 2 показано поперечное сечение емкостного дифференциального акселерометра, в котором инерционная масса расположена между верхней крышкой и основанием. Масса поддерживается четырьмя кремниевыми пружинами, верхняя крышка и основание отделены от массы расстояниями d_1 и d_2 . Все три элемента изготовлены на кремниевой подложке. На рис. 3 представлена упрощенная модель преобразователя «емкость–напряжение».

Площадь платины конденсатора C_{mc} , образованного массой и верхним электродом, равна S_1 , а площадь пластины второго конденсатора C_{mb} , образованного массой и основанием, – S_2 ;



E – напряжение питания, а ϕ_{1-3} – сигналы, от которых зависит работа схемы. При движении массы по направлению к верхнему электроду расстояние d_1 уменьшается на Δ , а расстояние d_2 увеличивается на столько же. Значение Δ равно механической силе F_m , действующей на массу, деленной на коэффициент упругости k кремниевой пружины:

$$\Delta = \frac{F_m}{k}.$$

Кроме того, эквивалентная схема акселерометра справедлива только тогда, когда на положение массы не влияют электростатические силы (т. е. когда емкость конденсаторов линейно зависит от F_m). Акселерометр стоит на входе управляемого суммирующего усилителя, выходное напряжение которого зависит от значений конденсаторов и, следовательно, от силы:

$$V_{\text{out}} = 2E \frac{C_{mc} - C_{mb}}{C_f}$$

Последнее уравнение справедливо только при малых значениях изменения емкостей датчика. Выходной сигнал акселерометра также зависит от температуры и рассогласования значений конденсаторов. Рекомендуется проводить калибровку датчиков во всем температурном диапазоне и соответсветственно корректировать выходной сигнал во время измерений. Другой эффективный способ повышения стабильности устройства – разработка системы самокалибровки или самотестирования, компенсирующей влияние электростатических сил, возникающих, когда на верхнюю крышку либо на основание подается высокое напряжение.

Ток подается поочередно на каждый из конденсаторов сенсора G-Cell на рис. 4 (схема полупроводникового инерциального датчика на примере датчика Freescale Semiconductor), где ST – контакт (Stand by) или дежурный режим; Yout и $X_{\rm out}$ – выходные данные для осей X и Y; $V_{\rm dd}$ (Voltage drain drain) - напряжение, которое подается на сток полевого транзистора, а V_{ss} (Voltage source source) – напряжение, подаваемое на исток в течение фиксированного временного интервала. При этом напряжение на выходе интегратора, обратно пропорциональное емкости конденсатора, фиксируется в блоке хранения и сравнения. Сигнал на выходе последнего пропорционален разности емкостей [4]. Далее сигнал поступает на фильтр нижних частот (ФНЧ), ограничивающий его высокочастотные составляющие, и усиливается еще одним усилителем, который одновременно обеспечивает температурную компенсацию. Для примера на рис. 5 приведена типовая форма импульса на выходе инерциального датчика с номинальным диапазоном $\pm 40 g$ при ударном воздействии вдоль чувствительной оси (при таком воздействии на выходе датчика появляется импульс, подобный импульсу на рис. 5, который после обработки представляется в числовом виде в зависимости от точности датчика; g – ускорение свободного падения).

Рассмотрим принцип действия гироскопа (монолитного кремниевого, принципиальная схема представлена на рис. 6). Все гироскопы вибрационного типа основаны на влиянии ускорения Кориолиса. Эффект, объясняемый силой энерции, был описан французским инженером-математиком Густавом-Гаспаром Кориолисом в 1835 г. Примененяя законы Ньютона к телам, переме-



Puc. 4



щающимся внутри вращающейся рамки, в уравнениях движения необходимо учитывать силу инерции, направленную вправо от направления движения тела при вращении рамки против часовой стрелки и влево – при вращении по часовой стрелке. Если тело движется линейно внутри опорной рамки, вращающейся вокруг оси, перпендикулярной направлению движения, в нем возникает ускорение Кориолиса. Это ускорение прямо пропорционально скорости вращения тела относительно третьей оси, перпендикулярной плоскости, образованной двумя осями. В микрогироскопах вращение заменено на вибрацию, а по возникающему ускорению можно судить и о скорости движения тела.

Самый первый вибраторный гироскоп состоял из двухрамочной структуры, подвешенной на двух вращающихся изгибных элементах (рис. 6). Структура имеет внутренние прорези, обеспечивающие свободное движение подвижных частей в активной области. Во время работы на рамку действует крутящий момент, возникающий из-за электростатических сил, появляющихся при подаче на электроды соответствующего управляющего напряжения, в результате чего она совершает колебательные движения с постоянной амплитудой. Эти вибрации передаются на внутреннюю рамку через внутренний изгибной элемент, вследствие чего инерционная масса также начинает колебаться. Если при этом гироскопический элемент будет совершать движение с угловой скоростью Ω вокруг оси, направленной перпендикулярно плоскости устройства, сила Кориолиса заставит внутреннюю рамку вибрировать относительно входной оси с частотой, равной управляющей частоте, и амплитудой, пропорциональной входной скорости Ω. Максимальная разрешающая способность достигается тогда, когда управляющая частота, поданная на внешнюю рамку, совпадает с резонансной частотой внутренней рамки. О значении входной угловой скорости судят по изменению емкости между внутренней рамкой и парой электродов. При работе схемы без обратной связи (ОС) угловое перемещение внутренней рамки относительно входной оси пропорционально входной угловой скорости. Это значит, что входной угол в прямо пропорционален отношению моментов инерции инерции (I_{x,y,z}), механической добротности Q, управляющему углу ϕ_0 , входной скорости Ω и обратно пропорционален управляющей скорости ω_n :

$$\theta = \left[\frac{I_x + I_y + I_z}{I_x}\right] \frac{\phi_0 \Omega Q}{\omega_n}$$

При работе по схеме с ОС балансировку внутренней рамки производят так, чтобы достигался ноль по фазе и квадратуре.

Для корректной работы резонатора подвесная система должна обеспечивать ему как можно более свободное движение.

Чтобы гироскоп обладал стабильными характеристиками на протяжении всего срока службы вне зависимости от условий окружающей среды, его резонатор изготавливают из кристаллического

.....



Puc. 6

Таблица	1
---------	---

Voportopuoturu	Модель			
ларактеристики	LSM9DS1 [5]	LSM6DSL [6]	LSM6DS3 [7]	
Состав	Акселерометр, гироскоп, магнетометр	Акселерометр и гироскоп	Акселерометр и гироскоп	
Диапазон измерения	±2/±4/±8/±16 g; ±245/±500/±2000 (диапазон полной шкалы)	±2, ±4, ±8, ±16 g; ±125/±245/±500/±1000/±2000 (диапазон полной шкалы)	±2, ±4, ±8, ±16 g; ±125/±245/±500/±1000/±2000 (диапазон полной шкалы)	
Напряжение питания, В	1.93.6	1.713.6	1.713.6	
Рабочая температура, °С	-4085	-4085	-4085	
Ток потребления, мкА	1.9	4.5	24	
ODR для акселерометра, Гц	14.9952	1.66664	12.56664	
ODR для гироскопа, Гц	14.9952	12.56664	12.51666	
Размер FIFO, Кбайт	8	4	8	
Потребление в режиме High- performance mode, мА	1.25	0.65	1.25	
Потребление в режиме Low-power mode, мА	0.25	0.29	0.9	

кремния методом травления. Плоская форма вибрирующего кольца гарантирует концентрацию всей мощности колебаний внутри одной плоскости, поэтому в данной конструкции не возникает паразитных связей между плоскостями, что гарантирует стабильность параметров резонатора в широком температурном диапазоне.

Вся конструкция размещается на стандартном герметичном металлическом корпусе для интегральных схем.

Рассмотрены три устройства, входящие в каждый из представленных IMU: LSM9DS1, LSM6DSL, LSM6DS3. В табл. 1 представлены их характеристики и дан сравнительный анализ их параметров.

Корпус модели LGA-14L: 2.5 × 3.0 × 0.83 мм [5].

IMU этой серии не обладают защитой от влаги, что делает нецелесообразным их использование в ситуациях, когда возможен контакт с водой. Следует предусмотреть на корпусе LGA-14L влагозащитное покрытие и сделать все выводные контакты водонепроницаемыми.

Одно из главных отличий платы LSM6DSL [6] и LSM6DS3 [7] от LSM9DS1 [5] – это различное количество степеней свободы, т. е. при использовании датчиков с одинаковыми габаритами в первом случае мы получаем 6 (акселерометр и гироскоп), а во втором – 9 степеней свободы (добавляется еще магнитометр).

Способы включения IMU. Питание LSM9DS1. Ядро устройства запитано по линии V_{dd} . Конденсаторы развязки источника питания $(C_2, C_3 = 100 \text{ нФ}$ керамика; $C_4 = 10 \text{ мкФ}$, Al) следует размещать как можно ближе к контакту питания устройства (общепринятая практика проектирования). Конденсатор C_1 (100 нФ) должен быть конденсатором с низким значением ESR и размещаться как можно ближе к выводу C_1 [5].

Все источники напряжения и заземления должны присутствовать одновременно, для обеспечения, надлежащего поведение ИС.

Питание LSM6DSL. Ядро устройства запитано по линии V_{dd} . Конденсаторы развязки источника питания (C_1 , $C_2 = 100 \text{ нФ}$, керамика) следует располагать как можно ближе к контакту питания устройства (общепринятая практика проектирования).

Функциональность устройства и измеренные данные об ускорении/угловой скорости выбираются и доступны через интерфейс SPI/I2C (Inter-IntegratedCircuits, межмикросхемное соединение). Функции, пороговое значение и синхронизация двух контактов прерывания для каждого датчика полностью программируются пользователем через интерфейс SPI/I2C [6], [7].

Питание LSM6DS3. Ядро устройства запитано по линии V_{dd} . Конденсаторы развязки источника питания (C_1 , $C_2 = 100 \text{ h}\Phi$, керамика) следует располагать как можно ближе к контакту питания устройства (общепринятая практика проектирования).

Функциональность устройства и измеренные данные об ускорении/угловой скорости выбираются и доступны через интерфейс SPI/I2C.

Функции, пороговое значение и синхронизация двух контактов прерывания для каждого датчика могут полностью программироваться пользователем через интерфейс SPI/I2C (см. [6, рис. 16 из Datasheet на LSM6DSL] и [7, рис. 16 из Datasheet на LSM6DS3]).

Важный параметр электрического устройства – это возможность использовать его совместно с другими для получения более сложных приборов и для выполнения намного более сложных операций.

Сопряжение LSM6DS3 и LSM6DSL с другими устройствами. Прибор может быть подключен к различным платам с использованием нескольких интерфейсов: SPI и I2S (последовательный протокол обмена данными IIC (также называемый I2C) использует для передачи данных две двунаправленные линии связи, которые называются шинами последовательных данных SDA (SerialData) и тактирования SCL (SerialClock)). Также имеются две линии для питания. Шины SDA и SCL подтягиваются к шине питания через резисторы [6], [7]. Кроме того, при подключении к SD0 он поддерживает 3-wire interface serial data output.

Сопряжение LSM9DS1. Как и упомянутые аналоги, он обладает всеми их способами коммуникации и сопряжения с другими устройствами на базе ARDUINO и их протоколов. Если объединить датчик и плату ARDUINO, то можно добиться сопряжения практически с любым устройством.

Подводя итоги, можно сказать, что выбранные датчики более чем совместимы с любыми устройствами, однако для передачи данных часто придется пользоваться платой-«посредником» (ARDUINO) [5].

К электрическим параметрам относятся: быстродействие, потребляемая мощность, помехоустойчивость и т. п. Разберем некоторые из них (табл. 2) на примере рассматриваемых микросхем.

Акселерометр и гироскоп моделей серии LSM6 более мощные, но менее чувствительные чем у LSM9. Кроме того, у модели LSM9 имеется чувствительный магнитометр, который не занимает лишнее место в корпусе.

Таблица 2

Параматр	Модель ІМИ			
Параметр	LSM9DS1 [5]	LSM6DS3 [7]	LSM6DSL [6]	
Потребляемая мощность	Всегда в режиме «Всегда включеный» – экономичный режим питания, до 1.9 мА	0.9 мА в комбинированном нормальном режиме и 1.25 в комбинированном высокопроизводительном режиме	0.4 мА в комбинированном нормальном режиме и 0.65 мА в комбинирован- ном высокопроизводи- тельном режиме (рабочий режим)	
Скорость считывания данных	14.9952 Гц	12.5 Гц6.66 кГц	12.5 Гц6.66 кГц	
Количество степеней свободы	9	6	6	
Чувствительность	0.0610.73 мГс/дел. (чувствительность магнетометра 0.140.58 мГс/дел.)	0.0610.49 мГс/дел.	0.0610.49 мГс/дел.	

Рассмотрены три датчика, сочетающие в своем исполнении акселерометр и гироскоп (из них 2 датчика серии LSM6) и акселерометр, магнитометр и гироскоп (1 датчик серии LSM9). Несмотря на то что акселерометры у датчиков 1-го типа более скоростные, чем у датчиков 2-го типа, у LSM9DS1 есть еще и чувствительный магнитометр, однако потребляемая мощность этого датчика выше (будет сильнее нагрев), чем у предыдущих, и он имеет только один режим работы, что не позволяет выставить необходимую потребляемую мощность.

Все датчики могут сопрягаться с одними и теми же устройствами так как их интерфейсы одинаковы. У приборов серии LSM6 есть два способа питания, а у приборов серии LSM9 –

один. Все указанные датчики не имеют защиты от влаги, поэтому целесообразно добавление влагозащитного корпуса.

Для применения в приборах, где необходимо достаточно точное и быстрое определение ускорения, угловой скорости и давления, выбирается акселерометр моделей LSM6, гироскоп модели LSM6DSL, так как у него самый чувствительный гироскоп, а на свободной площадке размещается магнитометр (применена контактная плата модели LSM9DS1). Магнитометр обычно используется в нормальном режиме питания, чтобы не превышать потребляемую мощность и не перегревать устройство, а в высокопроизводительном – при необходимости получать дополнительную информацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные датчики. Справочник «Мир Электроники». М.: Техносфера, 2005.

2. Электронные капитаны: iNEMO – новое семейство МЭМС-систем на кристалле. URL: https://www. compel.ru/lib/73676 (дата обращения 12.11.2020).

3. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5. Измерения и испытания / под ред. М. Д. Генкина.

4. Инерциальные МЭМС-датчики. URL: https:// www.compel.ru/lib/54207 (дата обращения 03.12.2020). 5. Datasheet LSM9DS1. URL: (https://www.st.com/ en/mems-and-sensors/lsm9ds1.html (дата обращения 10.11.2020).

6. DatasheetLSM6DSL. URL: https://www.compel.ru/ series/ST/LSM6DSL (дата обращения 11.11.2020).

7. DatasheetLSM6DS3. URL: https://www.st.com/en/ mems-and-sensors/lsm6ds3.html (дата обращения 09.11.2020).

S. V. Krasnitskiy Saint Petersburg Electrotechnical University

A. V. Belov

Leading Researcher of the Federal State Budgetary Scientific Institution «IEM»

SEMICONDUCTOR DEVICES FOR DETERMINING ACCELERATION, ALTITUDE, BODY DIRECTION AND TEMPERATURE OVERBOARD

The article will consider the composition of the IMU (Inertial measuring modules, a very widely demanded device, which, despite its small size, is able to determine important for navigation and other data to determine a larger device, which includes an IMU, places in space relative the selected coordinate system), the principle of its operation on the example of a classical kinematic inertial sensor, the advantages of a semiconductor and capacitive sensor over a kinematic sensor, the principle of operation of a semiconductor sensor, as well as a comparative characteristic of three inertial sensors of one company, some of their characteristics are considered that will help to draw a conclusion about the appropriateness combining these devices into one functional block (to combine all their strengths and eliminate certain disadvantages).

Acceleration, speed, voltage, capacitor, accelerometer, sensors, gyroscope, semiconductor, frequency, vibration