

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ: ТЕРМИНОЛОГИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, КРИТЕРИИ ВЫБОРА

Б.Александров

УДК 681.586.2
ВАК 05.27.00

Применение МЭМС-технологии для создания инерциальных датчиков последнего поколения позволило повысить их качество и популярность среди разработчиков разнообразных систем как потребительского, так и промышленного назначения. Однако многие специалисты испытывают затруднения при выборе наиболее подходящего для данного приложения компонента. Эти трудности связаны, главным образом, с терминологией, используемой для описания ключевых параметров и функциональных особенностей инерциальных датчиков. Рассмотрим наиболее устоявшуюся терминологию и основные характеристики современных инерциальных датчиков на примере гироскопов, а также основные критерии выбора компонента для разрабатываемого приложения.

До недавнего времени спектр задач, для решения которых применялись инерциальные датчики, был ограничен, главным образом, навигационными системами, а также некоторыми промышленными приложениями, например, такими как направленное бурение или стабилизация технологического оборудования. Круг специалистов, занятых разработкой и применением таких компонентов был сравнительно невелик. Успехи полупроводниковых технологий за последнее время, в частности, развитие технологии МЭМС, сделали гироскопы, акселерометры и инерциальные измерительные модули на их основе доступными для таких массовых рынков, как бытовая электроника, медико-диагностическая и спортивная аппаратура, игровое, мультимедийное, тренажерное оборудование, системы виртуальной реальности.

Стремительно увеличивается количество разработчиков РЭА, обоснованно принимающих решение об использовании в новых проектах инерциальных датчиков, однако некоторые из них испытывают трудности при выборе наиболее подходящих компонентов. Дело в том, что часто у разработчиков отсутствует ясное понимание той терминологии, которая применяется для описания ключевых характеристик и особенностей функционирования инерциальных датчиков, выполненных по технологии МЭМС.

Значительная часть массовых и недорогих датчиков движения – зарубежного производства, в результате чего отечественным разработчикам приходится пользоваться либо оригинальной технической документацией, либо их переводами, качество которых зачастую не высоко. В связи с этим, возникает острая необходимость для специалистов пользоваться выверенной

терминологией, которая достоверно описывала бы технические характеристики этих изделий и протекающие в них процессы. Это позволило бы избежать необоснованных претензий к производителям и поставщикам, а также правильно выбирать схемотехнические решения для систем на базе инерциальных датчиков.

Терминология, применяемая зарубежными производителями для описания характеристик инерциальных компонентов и изделий на их основе, не вполне "синхронизирована", хотя принимаются меры к ее стандартизации^{*}. Такая ситуация вызывает определенные трудности как при первичном отборе компонентов, так и при формальном выборе компонента по параметрам. Причина кроется, в первую очередь, в различных технологиях изготовления датчиков, но в еще большей степени – в различных методиках испытаний, о которых ведущие производители предоставляют краткую информацию в ТУ (datasheet). Это позволяет разработчику получить более полное представление о продукте до принятия решения о его применении.

Рассмотрим терминологию, используемую для описания характеристик гироскопов, которая является наиболее разработанной и имеет много общего с терминологией, применяемой для описания акселерометров и инерциальных измерительных модулей^{**}.

Смещение нуля (bias) или ошибка нуля, систематическая ошибка (bias error) – это значение выходного сигнала гироскопа, находящегося в состоянии покоя. Этот параметр обусловлен рядом факторов, в том числе: точностью калибровки (calibration errors), периодом времени между двумя последовательными включениями (run-to-run или switch-on to switch-on), дрейфом нуля (bias drift, initial bias, offset), влиянием температуры (bias variation over temperature, bias error with temperature) и последствиями ударного воздействия (effects of shock).

В процессе измерения смещения нуля крайне трудно исключить воздействие различного рода шумов, поэтому на практике принято оперировать усредненными данными серии измерений. Наиболее эффективным методом, фактически отраслевым стандартом, является метод дисперсии Аллана (Allan variance), суть которого заключается в вычислении среднеквадратического относительного отклонения следующих друг за другом данных измерений. Решающим фактором для получения достоверных данных по этому методу является выбор подходящего интервала времени, на котором производится выборка.

Дрейф нулевого сигнала (bias drift, initial bias, offset) связан в основном с тепловыми переходными

процессами в чувствительном элементе и преобразовательной схеме датчика при неизменных остальных воздействующих факторах. Его вклад в смещение нулевого сигнала наиболее значителен в период времени от нескольких секунд до нескольких минут после подачи питания.

Нестабильность нуля (bias instability) – это расчетная, статистическая характеристика, фундаментальный показатель качества гироскопа при первичном отборе. Это параметр представляет собой минимальное значение кривой дисперсии Аллана на заданном периоде усреднения значений выходного "нулевого" сигнала. Иными словами, этот параметр можно охарактеризовать как наилучшее достижимое значение стабильности нуля.

Стабильность нуля при включении или от включения к включению (bias stability in-run или bias stability run-to-run) – среднеквадратическая величина последовательно измеренных значений или фактический показатель повторяемости "нулевого" сигнала при заданных условиях эксплуатации. По сути, это ключевая характеристика, позволяющая обобщенно определить точность гироскопа.

Абсолютное значение стабильности нуля в десятки и даже в сотни раз превышает значение нестабильности нуля (табл.1). Таким образом, можно сформулировать физический смысл и практическую значимость двух основных параметров: **нестабильность нуля** – это наилучший показатель, достижимый на неподвижном гироскопе в лабораторных условиях, а **стабильность нуля** – это реальное значение, получаемое во время эксплуатации, которое, в соответствии с условиями применения, может зависеть от внешних факторов (температуры, ударов и т.д.) или деградировать в результате эффекта старения.

Существенными при выборе инерциальных датчиков в зависимости от конкретной области применения и решаемой задачи являются также следующие характеристики:

* IEEE Std 528-2001. IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology.

** www.siliconsensing.com/information-centre/glossary.

Таблица 1. Стабильность нуля, нестабильность нуля и определяющие их факторы*

Наименование параметра	Метод измерения (расчета)	Значение (прибл.)
Нестабильность нуля	Дисперсия Аллана (комнатная температура, в состоянии покоя)	< 0,1...1,0°/ч
Смещение нуля в температурном диапазоне	В рабочем диапазоне температур	5°/ч
Смещение нуля под влиянием вибрации	В заданном диапазоне вибрационных воздействий	5°/ч
Смещение нуля под влиянием линейного ускорения	В заданном диапазоне воздействующих линейных ускорений	5°/ч
Стабильность нуля при включении	Среднеквадратическое значение при заданных условиях эксплуатации	1...5°/ч
Дрейф нулевого сигнала	В состоянии покоя	30°/ч
Смещение нуля после ударных воздействий	После ударных воздействий высокой интенсивности	30°/ч
Старение	На протяжении нескольких лет	30°/ч
Стабильность нуля от включения к включению	Среднеквадратическое значение при заданных условиях эксплуатации	5...30°/ч

* www.tronicsgroup.com.

- случайный угловой уход (angle random walk) – ошибка определения угла с течением времени, вызванная собственными шумами системы, $^{\circ}/\sqrt{ч}$;
- масштабный коэффициент или крутизна выходной характеристики (scale factor) – чувствительность, отношение изменения выходного сигнала к изменению входного, В/°с (для аналогового сигнала) или LSB/°с (LSB – младший значащий бит, для цифрового сигнала);
- температурное смещение чувствительности (scale factor variation with temperature) – зависимость передаточной характеристики от рабочей температуры, %;
- нелинейность чувствительности (scale factor non-linearity), %;
- собственный шум (СКЗ) (quiescent noise, RMS), В (для аналогового сигнала);
- полоса пропускания (bandwidth), Гц;
- диапазон измерений (measurement range, dynamic range, full scale), $\pm^{\circ}/с$;
- чувствительность к линейному ускорению (linear acceleration effect, g-sensitivity), $^{\circ}/с/g$ или $^{\circ}/ч/g$;
- время включения – интервал времени от подачи питания до установления достоверных данных на выходе, с;
- напряжение питания, В;
- потребляемая мощность в номинальном и пиковом режиме, Вт;
- аналоговый или цифровой выходной сигнал, тип интерфейса;
- тип и размер корпуса;
- срок службы и наработки на отказ.

В зависимости от характеристик гироскопы принято делить на классы (табл.2). Следует отметить, что МЭМС-датчики имеют такие неоспоримые преимущества, как миниатюрность, сравнительно низкие цены и малое энергопотребление. С другой стороны, из-за компактных размеров МЭМС-гироскопов при массовом производстве трудно изготовить изделия со стабильностью нуля лучше, чем 5°/ч. Тем не менее, есть все технологические предпосылки к тому, что в недалеком будущем они максимально приблизятся к уровню гироскопов тактического класса (порядка 1°/ч и лучше), тем самым, значительно потеснив на рынке кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ).

Таблица 2. Области применения и характеристики гироскопов

Класс гироскопа	Стабильность нуля	Относительная точность*	Основная область применения
Бытовая электроника и автомобильная техника			
Бытовые	10 °/с	3%	Подвижные устройства, блоки
Автомобильные	1 °/с	0,3%	Система динамической стабилизации (ESP)
Высокоточные системы			
Индустриальные и тактические начального уровня	10 °/ч (скорость вращения Земли)	$10 \cdot 10^{-6}$	Наведение реактивных снарядов и управляемых боеприпасов
Тактические	1 °/ч	$1 \cdot 10^{-6}$	Стабилизация платформ
Краткосрочные навигационные	0,171 °/ч	$100 \cdot 10^{-9}$	Наведение ракет
Навигационные	0,01 °/ч	$10 \cdot 10^{-9}$	Космическая навигация
Стратегические	0,001 °/ч	$1 \cdot 10^{-9}$	Навигация подводных лодок

* Относительная точность определена как отношение стабильности нуля к рабочему диапазону угловых скоростей, который принят равным ± 300 °/с

Выбор компонентов для решения задач в области измерения и управления движением – это всегда комплексная процедура, учитывающая организационные, коммерческие и технические факторы. Единого, универсального решения, к сожалению, не существует, поскольку практически каждый проект в этой области имеет свои особенности и требует согласованного решения с участием задействованных сторон.

Кроме описанных выше технических характеристик при выборе конкретного компонента разработчик должен учитывать и другие факторы вне зависимости от типа и функционального назначения компонента, в том числе электромагнитную совместимость, ударную/вибрационную стойкость, радиационную стойкость, помехоустойчивость, климатические ограничения на применение, устойчивость к воздействиям агрессивных сред, разброс параметров от партии к партии, а также требования к технологии монтажа, условиям и длительности хранения до установки на изделие и в его составе.

Кроме того, следует руководствоваться и другими критериями отбора инерциальных датчиков для разрабатываемой системы, а именно:

- страной происхождения, наличием локальной инфраструктуры технического сопровождения и гарантийного обслуживания;
- необходимостью лицензирования для экспорта в РФ и страны ТС;
- наличием сертификата, необходимостью получения разрешения на применение;

- подтвержденной историей применения в подобной или аналогичной технике;
- сроками производства/поставки;
- ценой, схемой оплаты;
- заявленным производителем сроком службы компонента, планами модернизации, преемственностью с последующими моделями;
- наличием на рынке и доступностью изделий с аналогичными характеристиками.

Таким образом, правильная интерпретация технических характеристик элемента, соотнесение их с назначением и областью применения всего изделия, учет коммерческих и логистических факторов позволяют повысить качество принятия решения при выборе компонентов инерциальных измерительных и управляющих систем. ●