

Colibrys:

современные технологии со швейцарским качеством

Юрий ПОНОМАРЕВ,
к. т. н.
sensor@ranet.ru

В статье представлен обзор новых продуктов компании Colibrys: акселерометров, инклинометров и гироскопов, с успехом применяемых для решения всевозможных задач, связанных с навигацией и управлением движением в промышленном секторе, аэрокосмической и энергетической областях.

Компания Colibrys появилась в 2001 году, отделившись от Швейцарского технологического инкубатора. Из года в год, решая все новые задачи, компания превращалась в серьезного игрока на рынке инерциальных датчиков и в 2013 году стала частью всемирно известной группы компаний Safran, получив доступ ко всем предоставляемым ею ресурсам и накопленным знаниям.

Первоначально штаб-квартира компании располагалась в городе Невшатель в Швейцарии, но позже меняла свое месторасположение и сегодня вместе с производственными площадями находится в швейцарском городе Ивердон-ле-Бен (рис. 1). Одним из важных достоинств компании является то, что все производство как самого чувствительного элемента, так и электрони-

ки находится в Швейцарии, что дает компании статус независимого и надежного производителя и партнера. До недавнего времени Colibrys являлась мировым лидером в области разработок и поставок стандартных и полузаказных акселерометров на основе MEMS-технологии (рис. 2), а сегодня, после присоединения к группе Safran, компания предлагает и линейку вибрационных гироскопов, что открывает ей путь к созданию собственных инерциальных модулей и выходу на новые рынки.

Компания Colibrys является производителем, организованным по принципу «все в одном», и предлагает полный спектр услуг, начиная от разработки и заканчивая производством и тестированием высокоточных акселерометров, гарантируя клиентам лучшие в своем классе характеристики и уровень ис-

полнения, надежность конструкции, высочайшее швейцарское качество, разумные цены и сроки изготовления. Большое количество заказчиков из различных секторов уже убедились в этом на практике, заложив датчики Colibrys в конструкции своих серийных изделий. В результате среди клиентов датчики зарекомендовали себя как изделия с высоким уровнем точностных характеристик, высокой стабильностью и ударопрочностью, низким уровнем шумов и энергопотреблением.

Colibrys в железнодорожном секторе

Быстрорастущий рынок высокоскоростных железнодорожных путей сообщения и высокоскоростных подвижных составов уже продиктовал требование усиления без-



Рис. 1. Новая штаб-квартира компании Colibrys в г. Ивердон-ле-Бен в Швейцарии

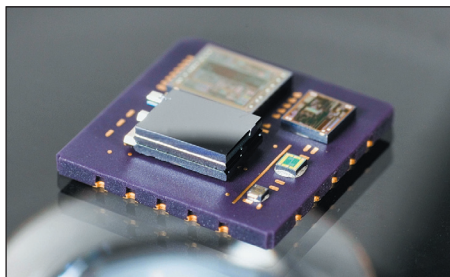


Рис. 2. МЭМС-акселерометр компании Colibrus (без крышки)

опасности перевозок, что повлекло за собой повышение требований к системам контроля и управления железнодорожными составами. Этот факт в совокупности с желанием уменьшить затраты на содержание, облегчить планирование проведения ремонтных работ и повысить уровень комфорта пассажиров влекут необходимость применения высокотехнологичных решений при построении подобных систем, неотъемлемой частью которых становится огромное количество всевозможных датчиков. При этом львиная доля здесь отводится акселерометрам, измеряющим различные виды механических движений, таких как ускорение, углы наклона, вибрации и удары. Для решения указанных задач могут быть применены различные типы акселерометров: емкостные, пьезорезистивные и пьезоэлектрические, к которым предъявляются одновременно требования высокого уровня характеристик и высокой временной и температурной стабильности. Победителем в данной борьбе выходят емкостные акселерометры, обладающие лучшими характеристиками в плане надежности, долговременной стабильности, отношения сигнал/шум, прочности, размеров и энергопотребления при измерении в диапазоне низких и средних частот.

Одним из примеров успешного применения емкостных МЭМС-акселерометров в железнодорожных поездах является система мониторинга в немецких высокоскоростных поездах ICE (рис. 3). Компания Siemens разработала систему мониторинга для тележек вагонов (рис. 4), которая определяет износ различных узлов тележки: подшипников, валов, тормозов, колес — и на основании полученной информации выявляет потенциально возможные неисправности, способные спровоцировать аварию. В этой системе используется 24 датчика Colibrus на один вагон и около 200 датчиков на весь поезд. Первые три поезда были созданы в 2010 году, а окончательная сертификация пройдена в 2011-м.

Другим интересным примером использования емкостных акселерометров Colibrus следует назвать систему контроля за нормальными ускорениями в кренящихся поездах, которая измеряет боковые ускорения,



Рис. 3. Высокоскоростной поезд ICE с системой мониторинга за состоянием тележек Siemens

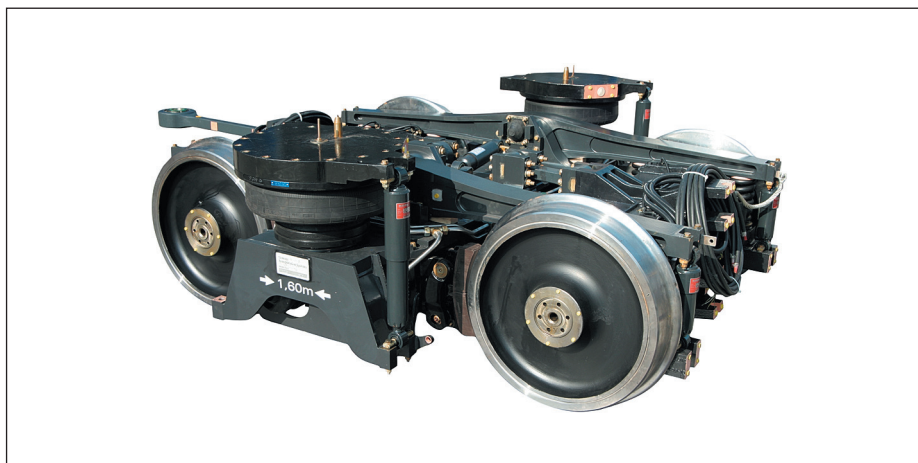


Рис. 4. Тележка железнодорожного вагона с системой мониторинга Siemens

действующие на вагон при его повороте, и наклоняет вагон таким образом, чтобы сила тяжести компенсировала боковое ускорение. В результате эта система повышает уровень комфорта пассажиров, поскольку они не чувствуют боковых ускорений, возникающих при повороте поезда.

В общем и целом, в железнодорожной сфере инерциальные датчики могут применяться для решения таких задач, как:

- контроль и диагностика вагонных тележек для повышения уровня безопасности и комфорта;
- слежение за углом крена в высокоскоростных кренящихся поездах для компенсации нормальных ускорений, действующих на пассажиров во время поворота поезда;
- контроль положения в поездах на магнитной подушке;
- системы управления;
- системы контроля за техническим состоянием подвижного состава;
- контроль за уровнем ударов во время транспортировки;

- высокоточное определение положения вагонов;
- системы измерения геометрии пути.

Компания Colibrus предлагает различные типы акселерометров для решения указанных задач:

- датчик вибрации VS9000, имеет малые размеры, полоса пропускания по уровню 5% составляет 1 кГц, доступен с различными диапазонами измерений от ± 2 до ± 200 g;



Рис. 5. Датчик вибрации VS1000 компании Colibrus

- датчик вибрации VS1000 (рис. 5) является новинкой 2015 года и представляет собой усовершенствованный вариант VS9000. VS1000 предлагает лучшую в своем классе комбинацию стабильности нуля, ударопрочности, линейности и шумовых характеристик. Этот датчик имеет усовершенствованный чувствительный элемент, улучшенное крепление узлов к подложке, новую электронику с частотой работы 200 кГц, датчик температуры, что в совокупности позволяет получить гладкую АЧХ от 0 до 1500 Гц (min) с отклонением в пределах 5%. Новый блок электроники позволил уменьшить температурные коэффициенты изменения нулевого сигнала и масштабного коэффициента до $\pm 0,2 \text{ mg/}^\circ\text{C}$ (max) и $120 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ соответственно. Так же как и предыдущий вариант, датчик доступен с различными диапазонами измерений от ± 2 до $\pm 200 \text{ g}$;
- линейка акселерометров MS9000, спроектированная для решения задач измерения ускорений, где требуется долговременная стабильность параметров выходного сигнала.

Colibrys в нефтегазовом секторе

В оборудовании для энергетического сектора, в частности для нефтегазовой отрасли, применяется огромное количество датчиков, выполняющих различные функции. Среди этого множества наиболее широко используемыми являются акселерометры, необходимые для выполнения целого ряда измерений, начиная от измерения линейного ускорения и заканчивая измерениями вибраций и ударов, низкочастотных сейсмических колебаний, наклонов. К числу подобных задач, которые выиграли от применения МЭМС-технологии, можно отнести следующие:

- высокоточное определение углов наклона бура во время бурения скважин и во время каротажа;
- дистанционное управление и определение местоположения в отсутствие сигналов спутниковых навигационных систем;
- геофизическое исследование недр земли;
- внутрискважинные сейсмические исследования;
- мониторинг состояния строительных сооружений (дамбы, ветряные генераторы, АЭС и т. д.) и оборудования;
- решение задач инерциальной навигации при исследовании трубопроводов внутритрубными снарядами;
- решение задач стабилизации и инклинометрии.

Сегодня подземное бурение представляет собой хорошо отлаженный процесс. В зависимости от месторасположения предполагаемой скважины, структуры верхних слоев земли и назначения скважины процессы бурения и используемое оборудование могут сильно отличаться. Например, бурение мелких или глубоких вертикальных скважин или направленное горизонтальное бурение, как для добычи нефти и газа, так и для прокладки горизонтальных туннелей и каналов для нужд строительства (рис. 6). В каждом из указанных вариантов к используемому оборудованию и к отдельным его компонентам предъявляются различные требования, а в связи с тем, что бурение происходит в жестких условиях окружающей среды при действии вибрации, температуры и коррозии, требования эти достаточно жесткие.

В большинстве случаев посредством инерциальных датчиков решаются две задачи — инерциальная навигация во время бурения и построение карты уже пробуренной скважины. В первом случае целью является бурение по заданной траектории и попадание буром в нужную точку с минимальными по-

грешностями. Задача аналогична задаче построения системы управления, например, летательным аппаратом на базе инерциального модуля с тремя гироскопами и акселерометрами, за тем исключением, что в данном случае происходит управление буром во время бурения. Бурение, безусловно, подразумевает большой уровень ударов и вибраций, в связи с этим вибрационные ошибки датчиков и смещение нуля после воздействия ударов должны иметь минимально возможные значения.

Во втором случае при построении карты скважины посредством каротажного зонда определяются углы наклона различных участков скважины и азимут каждого из участков. Наиболее простое решение — это применение трех акселерометров в комбинации с тремя магнитометрами. При высоком уровне окружающих магнитных полей вместо магнитометров или совместно с ними применяются гироскопы, выполняющие функцию гирокомпаса.

В обеих ситуациях увеличение стабильности выходных сигналов датчиков приводит к увеличению точности измерений, к снижению количества точек останова для измерений, а соответственно, и к удешевлению стоимости работ. И здесь компания Colibrys имеет ряд интересных решений, которые удовлетворяют большому количеству требований, предъявляемых к датчикам в нефтегазовом секторе. Например, акселерометр TS9000 (рис. 7) может быть использован для решения задач управления, и как инклинометр. Он доступен с двумя диапазонами измерений ± 1 и $\pm 2 \text{ g}$ и идеально подходит для выполнения указанных задач.

Основными особенностями этих датчиков являются:

- возможность работы в жестких условиях эксплуатации: акселерометры TS9000 имеют большую ударопрочность и выдерживают удары до 6000 g практически без влияния на характеристики. Одновременно с этим датчики имеют хорошую устойчивость к вибрации. Помимо линейки TS9000, у Colibrys существует линейка HS8000, которая способна выдерживать удары до 20 000 g;



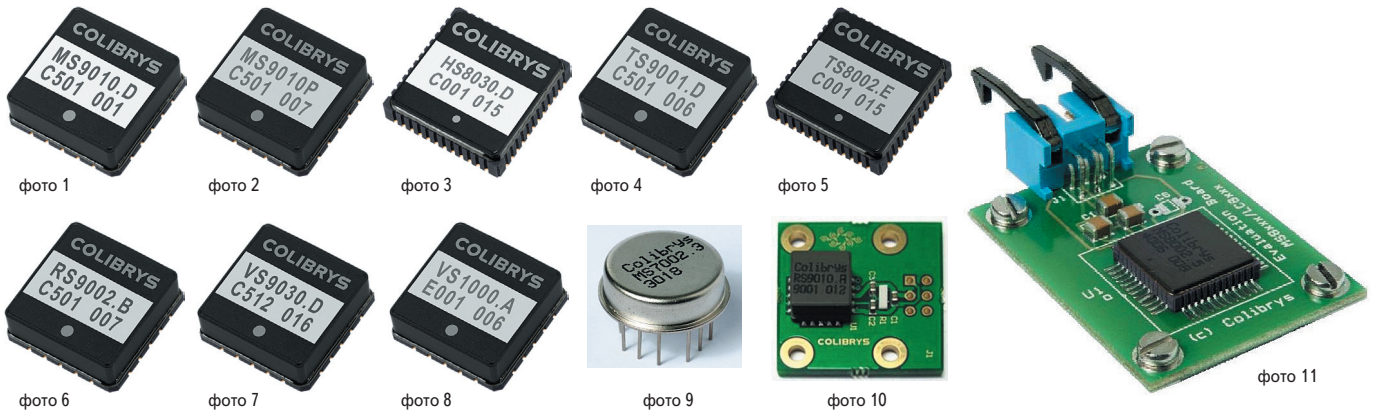
Рис. 6. Морская буровая платформа



Рис. 7. Акселерометр серии TS9000 компании Colibrys




Таблица 1. Технические характеристики акселерометров

Функциональное назначение/наименование серии	Модель	Тип корпуса	Диапазон измерений, g	Стабильность нулевого сигнала в течение года (при 1000 g), мг, тип. (max)	ТКИ нулевого сигнала, мг/°С, тип.	Масштабный коэффициент, мВ/g	Стабильность МК в течение года ^{1,2} , ppm/°С, тип. (max)	ТКИ масштабного коэффициента, ppm/°С, тип.	Разрешающая способность (для полосы пропускания 1 Гц), мг, max	Нелинейность (от полного диапазона), %, max	Полоса пропускания (по уровню 3 дБ), Гц	Спектральная плотность шума, мкВ/√Гц, тип.	Диапазон рабочих температур, °С	Отладочная плата
Акселерометры, инклинометры/серия MS9000	MS9001.D	LCC20 8,9×8,9×3,2 мм (фото 1)	±1	0,15 (<0,75)	<0,05	2000 ±8	300 (<1000)	100	<0,05	<0,7	100	18	-55...+125	EVBA-MS9xxx.D (фото 10)
	MS9002.D		±2	0,3 (<1,5)	<0,1	1000 ±8			<0,1	<0,8				
	MS9005.D		±5	0,75 (<3,75)	<0,25	400 ±4			<0,25	<0,8				
	MS9010.D		±10	1,5 (<7,5)	<0,5	200 ±2			<0,6	<0,9				
	MS9030.D		±30	4,5 (<22,5)	<1,5	66,6 ±1			<1,7	<0,9				
	MS9050.D		±50	7,5 (<37,5)	<2,5	40 ±1			<2,8	<1				
	MS9100.D		±100	15 (<75)	<5	20 ±1			<5,5	<1				
MS9200.D	±200	30 (<150)	<10	10 ±1	<11	<1 ³								
Акселерометры/серия MS9000P	MS9010P доп. диапазоны по запросу	LCC20 8,9×8,9×3,2 мм (фото 2)	±10	<2, 1σ ⁴	±1, max	200 ±2	<300, 1σ ⁴	75 ±100		<0,9	>200	150 мкг/√Гц, max	-55...+125	
Акселерометры/серия MS8000	MS8002.D	LCC48 14,2×14,2×2,4 мм (фото 3)	±2	1,5 (<5)	<0,1 ⁵	1000 ±8	300 (<1000)	100 ⁵	<0,1	<0,8	200	18	-55...+125	EVBA-MS8xxx.D (фото 11)
	MS8010.D		±10	7,5 (<25)	<0,5 ⁵	200 ±2			<0,6	<0,9				
	MS8030.D		±30	22 (<75)	<1,5 ⁵	66,6 ±1			<1,7	<0,9	100			
	MS8100.D		±100	75 (<250)	<5 ⁵	20 ±1			<5,5	<1	200			
Инклинометры/серии TS9000 и TS9000P	TS9001	LCC20 8,9×8,9×3,2 мм (фото 4)	±1	0,15 (<0,75)	<0,05	2000 ±8	300 (<1000)	100	<0,05	<1	100	18	-55...+125	
	TS9002		±2	0,3 (<1,5)	<0,1	1000 ±8			<0,1	<0,8		18		
	TS9002P		±2	<0,5, 1σ ⁴	±0,2, max	1000 ±8			<0,8	<0,8		>200		
Инклинометры/серии TS9000 и TS9000P	TS8002	LCC48 14,2×14,2×2,4 мм (фото 5)	±2	0,086 ⁶ (<0,28 ⁶)	0,0057 ⁶ /°С, тип		300 (<1000)	100	0,0057 ⁶ , max	<1	100	18	-40...+125	
Акселерометры, инклинометры/серия MS9000	RS9002.B	LCC20 8,9×8,9×3,2 мм (фото 6)	±2	<0,5, 1σ ⁴	±0,2, max	1000 ±8	<300, 1σ ⁴	75 ±100		<0,8	>200	30 мкг/√Гц, max	-55...+125	EVBA-RS9xxx.D (фото 10)
	RS9010.B		±10	<2, 1σ ⁴	±1, max	200 ±2			<0,9	150 мкг/√Гц, max				
Датчики вибрации/серия VS9000	VS9002.D	LCC20 8,9×8,9×3,2 мм (фото 7)	±2	1,5 (<5) ¹	<0,1 ⁵	1000 ±8	300 (<1000)	100	<0,1	<0,8	250 ⁶	25	-55...+125	
	VS9005.D		±5	3,75 (<12,5) ¹	<0,25 ⁵	400 ±4			<0,3	700 ⁶				
	VS9010.D		±10	7,5 (<25) ¹	<0,5 ⁵	200 ±2			<0,6					
	VS9030.D		±30	22 (<75) ¹	<1,5 ⁵	66,6 ±1			<1,7	<1	1000 ⁶			
	VS9050.D		±50	37,5 (<125) ¹	<2,5 ⁵	40 ±1			<2,8					
	VS9100.D		±100	75 (<250) ¹	<5 ⁵	20 ±1			<5,5					
	VS9200.D		±200	150 (<500) ¹	<10 ⁵	10 ±1			<11	<1 ³				
Датчики вибрации/серия VS1000	VS1002.D	LCC20 8,9×8,9×3,2 мм (фото 8)	±2		±0,2	1350	120		0,1		250 ⁶	7 мкг/√Гц	-55...+125	
	VS1005.D		±5		±0,5	540					700 ⁶	17 мкг/√Гц		
	VS1010.D		±10		±1	270					1000 ⁶	34 мкг/√Гц		
	VS1030.D		±30		±3	90						85 мкг/√Гц		
	VS1050.D		±50		±5	54						150 мкг/√Гц		
	VS1100.D		±100		±10	27						334 мкг/√Гц		
	VS1200.D		±200		±20	13,5						670 мкг/√Гц		
Датчики вибрации/серия MS7000	MS7002.3	TO8 Ø15,55×3,9 мм (фото 9)	±2	2 (<6) ¹	<0,1	500 ±4	500 (<1000) ¹	100	<0,1	<0,8	800	7	-40...+125	
	MS7010.3	±10	10 (<30) ¹	<0,5	100 ±1	<0,6			<0,9	650				



тип. — типовое значение; max — максимальное значение; ТКИ — температурный коэффициент изменения; МК — масштабный коэффициент.
 1 — стабильность в течение года определена согласно стандарту IEEE 528-2011: включение/выключение, хранение при температурах -55...+85 °С, термоциклирование -40...+125 °С, механические воздействия, вибрация, удары при температурах -55...+85 °С в выключенном состоянии (единичный удар по одной оси 6000 g).
 2 — стабильность в течение года определена согласно стандарту IEEE 528-2011: включение/выключение, хранение при температурах -55...+85 °С, термоциклирование -40...+125 °С, механические воздействия, вибрация, удары при температурах -55...+85 °С в выключенном состоянии (единичный удар по одной оси 1000 g).
 3 — нелинейность для акселерометра с диапазоном ±200 g определена для диапазона ±100 g.
 4 — составная повторяемость в течение года представляет собой стабильность остаточной ошибки, определенной согласно стандарту IEEE 528-2011: включение/выключение, хранение при температурах -55...+85 °С, термоциклирование -400...+125 °С, вибрация и удары (единичный удар по всем направлениям 6000 g, 0,2 мс).
 5 — температурные коэффициенты определены для диапазона температур -40...+20 °С, где зависимость имеет линейный характер и принимает максимальное значение.
 6 — полоса пропускания указана по уровню 5%.

Таблица 2. Технические характеристики гироскопов

Функциональное назначение / наименование серии	Модель	Фото корпуса	Тип корпуса	Диапазон измерений, °/с	МК (цифровой выход, RS422 или RS232, 500 или 1000 Гц), бит	МК (аналоговый выход, дифференциальный), В/°/с	ТКИ масштабного коэффициента (-50...+85 °С), ppm, 1σ	Нестабильность нуля (по девиации Аллана), °/ч	Случайный угловой уход (ARW), °/ч	Уровень шума в диапазоне частот от 0,1 до 100 Гц, °/с, СКО	Полоса пропускания (по уровню 3дБ), Гц	Потребляемая мощность, Вт, тип.	Вибрация (5, 2000 Гц)	Ударные воздействия	Диапазон рабочих температур, °С	
Датчики угловой скорости (гироскопы) / серия GS1000	GS1060		∅ 20,8×35 мм (без фланца) + плата электроники 41×82 мм	±60	24	±0,166	2500	0,15	0,005	0,015	>100	2	Mil Std 810 Method 514.6-II	Mil Std 810 Method 514.6-I	-50...+80	
	GS1100			±100		±0,1										
	GS1120			±120		±0,083										
	GS1180			±180		±0,055										
	GS1250			±250		±0,04										
Датчики угловой скорости (гироскопы) / серия GM1000	GM1060		Д×Ш×В, 89×40×40 мм	±60	Модуль представляет собой один из гироскопов серии GS1000 с электроникой, установленные в корпус; характеристики те же, что и у гироскопов серии GS1000											
	GM1100			±100												
	GM1120			±120												
	GM1180			±180												
	GM1250			±250												
Датчики угловой скорости (гироскопы) / серия GM1000Px	GM1060Px		Д×Ш×В, 107×107×68 мм	±60	1-, 2- или 3-осный модуль, представляет собой сборку из гироскопов серии GS1000 с электроникой, установленные в корпус; характеристики те же, что и у гироскопов серии GS1000											
	GM1100Px			±100												
	GM1120Px			±120												
	GM1180Px			±180												
	GM1250Px			±250												

тип. — типовое значение; max — максимальное значение; ТКИ — температурный коэффициент изменения; МК — масштабный коэффициент.

1 — для аналогового выхода, 2σ; Bias instability на графике девиации Аллана.

2 — для аналогового выхода, 2σ; Angle random walk на графике девиации Аллана.

- широкий температурный диапазон: все акселерометры компании Colibrys гарантированно работают в диапазоне температур от -55 до +125 °С. Но хотя это и не указано в спецификации, ряд клиентов успешно применяет акселерометры и при температурах до +150 °С;

- высокая стабильность: в другой линейке датчиков наклона TS9000P достигнута чрезвычайно высокая временная стабильность параметров — менее 100 ppm и лучше, даже в жестких условиях эксплуатации. Коэффициент вибрационных ошибок составляет 150 мкг/г².

Таким образом, емкостные МЭМС-акселерометры являются лучшим вариантом как в нефтегазовом секторе, так и на быстроразвивающемся мировом рынке высокоскоростных железных дорог для решения задач контроля и управления движением в поездах, где количество используемых датчиков становится все больше, поскольку из года в год к таким системам предъявляются все более жесткие требования, а целый ряд успешно реализованных проектов на базе датчиков компании Colibrys позволяет занять компании лидирующие позиции в этом направлении.

В заключение обзора хотелось бы упомянуть еще о двух продуктах компании, которые в момент написания статьи еще не были официально анонсированы. Во-первых,



Рис. 8. Камертонный гироскоп компании Colibrys

это датчики наклона серии TS1000, которые по неофициальной информации должны выйти в конце 2015 года. Особенность этих акселерометров заключается в расширенном температурном диапазоне: датчик сможет работать при температуре до +150 °С и ограниченное время при температуре до +175 °С, что будет отражено в спецификации.

Второй продукт — камертонные датчики угловой скорости серии GS1000 (рис. 8) и построенные на их основе гироскопические модули GM1000 и GM1000Px. Гироскоп GS1000

не является гироскопом на основе МЭМС-технологии, а представляет собой один из классических вариантов камертонных гироскопов типа «Квапазон» с четырьмя вибрирующими металлическими балками, что, безусловно, сказывается на его габаритах, но одновременно позволяет получить надежную конструкцию и гораздо более высокие точности. Например, нестабильность нуля составляет 0,15 °/ч, а среднее время наработки на отказ 1 млн ч. По характеристикам гироскоп позиционируется как более высокоточный, чем МЭМС-гироскопы и чем ВОГи с открытым контуром. Описание гироскопа уже сейчас доступно на сайте производителя и на сайте компании «Радиант» — официального дистрибьютора компании Colibrys в России.

В таблице 1 представлены технические характеристики акселерометров, а в таблице 2 — технические характеристики гироскопов.

Литература

- Down borehole and directional drilling. Colibrys application notes.
- Krebs Ph. High performances MEMS accelerometers are used in railway applications // Advanced electronics. 2011.
- www.colibrys.com
- www.siemens.com