

М. Б. БОГДАНОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА АИСТ-350Т НА СТОЙКОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

При проектировании навигационных систем для малогабаритных высокоманевренных объектов следует проверить функционирование измерительной элементной базы при механических воздействиях, так как в паспортах на элементы такая информация отсутствует. В статье приводятся основные результаты исследовательских испытаний отечественного инерциального измерительного блока АИСТ-350Т на стойкость к механическому удару, к синусоидальной и случайной широкополосной вибрации.

Введение

При построении бесплатформенной инерциальной навигационной системы для высокоманевренных объектов необходим инерциальный измерительный блок (ИИБ), обладающий необходимой точностью в жестких условиях эксплуатации и имеющий малую массу, габариты и стоимость. Примером такого блока являются блоки иностранного производства SilMU02, HG1930, SDI500 и др. [1–3]. В табл. 1 приведены основные характеристики блоков (по рекламным материалам).

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики иностранных ИИБ

Характеристика	Блок SilMU02		Блок SDI500 (версия AA0)	
	Каналы ДУС	Каналы АКС	Каналы ДУС	Каналы АКС
Диапазон измерений	до ± 14000 град/с	до ± 100 g	$>\pm 1000$ град/с	$>\pm 50$ g
Нестабильность нуля от включения к включению (1σ)	≤ 100 град/ч	$\leq 10^{-3}$ g	1 град/ч	$0,5 \cdot 10^{-3}$ g
Нестабильность нулевого сигнала в запуске	≤ 6 град/ч	$\leq 0,5 \cdot 10^{-3}$ g	$\leq 1,0$ град/ч (1σ)	$0,2 \cdot 10^{-3}$ g
Случайный шум	$\leq 0,5$ град/ $\sqrt{ч}$	$\leq 0,5$ м/с/ $\sqrt{ч}$	0,02 град/ $\sqrt{ч}$	-
Погрешность коэффициента передачи (1σ), ppm	≤ 500	≤ 1500	< 300	200
Масса, г	< 210		< 600	
Рабочий удар	250 g		150 g, 11 мс	
Рабочая вибрация в диапазоне частот 20...2000 Гц, rms	18 g		19 g	

Иностранные разработчики редко представляют информацию о характере сигналов измерительных каналов в жестких условиях эксплуатации. В рабо-

Богданов Максим Борисович. Кандидат технических наук, доцент кафедры ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», докторант. Член секции молодых ученых Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

те [4] указано, что в блоке SilMU02 используется акселерометр серии HS8000 разработки фирмы Colibrys и приводятся следующие результаты испытаний:

- изменение нулевого сигнала после воздействия широкополосной случайной вибрации (ШСВ) в диапазоне частот 20–2000 Гц со среднеквадратичным значением ускорения 20 g составляет 10^{-2} g (1 σ);
- чувствительность нулевого сигнала к амплитуде синусоидальной вибрации в диапазоне частот 20–2000 Гц в среднем 10^{-4} g/g²;
- изменения нулевого сигнала при воздействии ударов до 22000 g составляет 15×10^{-3} g и коэффициента передачи 1200 ppm;
- изменение нулевого сигнала при воздействии одиночного удара 40000 g составляет 14×10^{-3} g.

Массовое приобретение указанных блоков иностранного производства невозможно, так как они применяются в военных технологиях зарубежных стран. Судя по доступным публикациям, среди отечественных разработчиков только три предприятия добились положительных результатов в проектировании и серийном производстве малогабаритных ИИБ: i-Sense, ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и ОАО «Гирооптика» [5–7].

По ряду объективных причин, среди которых доступность информации о продукции, наличие готовых решений без необходимости затрат времени на доработку под конкретную задачу, характеристики блоков (диапазон измерений угловых скоростей и ускорений, точность измерений и др.), а также невысокая стоимость, выбран ИИБ АИСТ-350Т [5]. Изготовитель гарантирует работоспособность блока в условиях ШСВ в диапазоне частот 20–2000 Гц со среднеквадратичным значением ускорения 5 g и в условиях удара 100 g длительностью 5 мс. Данных о работоспособности блока и характеристиках выходных сигналов при синусоидальной вибрации, а также в условиях более скоротечных механических ударов и ШСВ с большим ускорением в документации на прибор нет. Поэтому появилась потребность в исследовательских испытаниях, которые позволили бы изучить характеристики сигналов ИИБ в условиях механических внешних воздействующих факторов (ВВФ). Термин «исследовательские испытания» пояснен в ГОСТ [8]. С этой целью приобретенный в 2011 г. один из первых серийно выпущенных блоков (заводской № 0313) подвергся полному циклу испытаний. В названии указанного блока еще отсутствует литера «Т», введенная изготовителем в 2013 г.

В данной статье приведены основные результаты испытаний. Материал статьи окажется полезным для исследователей и разработчиков инерциальных измерительных блоков и навигационных систем на их основе, а перечень стандартов [8, 10–18] – при разработке программ и методик испытаний приборов и узлов на стойкость к ВВФ.

Объект, программа и условия проведения испытаний

Представленные разработчиком габаритные размеры ИИБ и оси связанной с ним системы координат показаны на рис. 1. Блок содержит микромеханические датчики угловой скорости, микромеханические акселерометры, термостат с системой его управления, платы АЦП, электропитания и интерфейса. Рабочий диапазон измерений угловой скорости ± 400 град/с (предельный ± 500 град/с), рабочий диапазон измерений линейного ускорения ± 15 g (предельный ± 16 g). Масса ИИБ менее 170 г. Остальные характеристики приведены на сайте [5].

Изготовитель не предоставляет информации о конструктивных и схемотехнических решениях по обеспечению ударо- и вибропрочности и устойчивости. Можно предположить, что часть решений заимствована из прототипа – блока «АИСТ-320» [9].

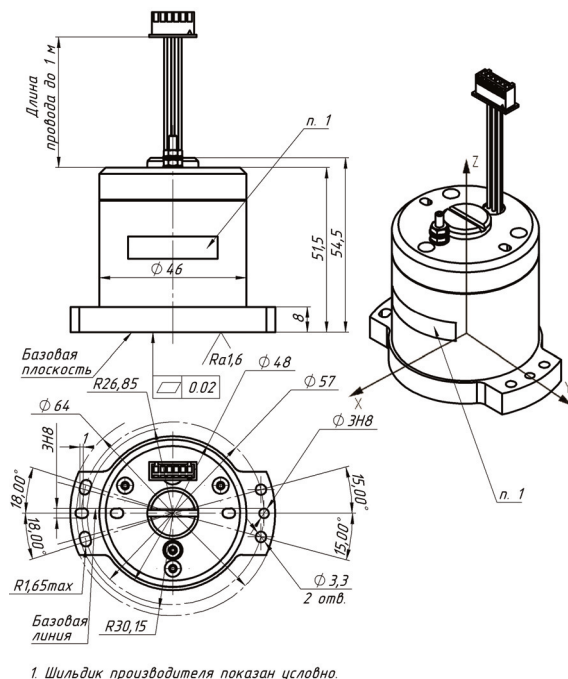


Рис. 1. Габаритные размеры ИИБ и оси связанной с ним системы координат

Испытания проведены в три этапа. На первом этапе производились испытания ИИБ на воздействие одиночного удара, на втором – на воздействие ШСВ, на третьем – на воздействие синусоидальной вибрации. Климатические условия проведения испытаний соответствуют нормальным [10]. При разработке программы и методики испытаний применены стандарты [11–18]. В целях определения влияния механических ВВФ на ИИБ, до испытаний и после произведена оценка основных характеристик блока. Для этого привлекались специалисты и оборудование фирмы i-Sense и ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Механический удар

При испытании оси X и Y ИИБ располагались в плоскости, близкой к горизонтальной. Направление действия ударного ускорения – вдоль оси Z (см. рис. 1). Количество ударов – один. Параметры удара: пиковое ударное ускорение 100 g, длительность импульса 2 мс, с временем достижения максимального значения 1 мс. Осциллограмма удара показана на рис. 2. На рис. 3 представлены графики сигналов измерительных каналов ИИБ, записанные в ходе воздействия удара. При анализе графиков следует иметь в виду, что частота обновления выходных данных ИИБ 250 Гц, т. е. шаг по времени равен 4 мс.

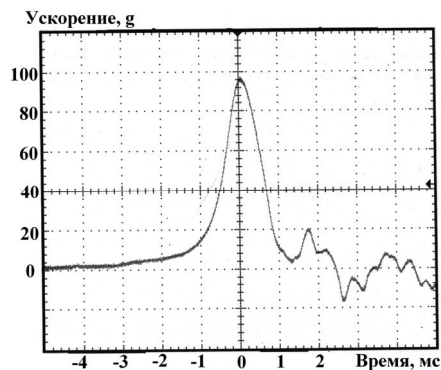


Рис. 2. Осциллограмма удара, измеренная с помощью штатных средств испытательного стенда

После воздействия удара в сигналах измерительных каналов наблюдаются затухающие колебательные процессы. Время затухания до 0,4 с. Частоту колебательных процессов оценить не представляется возможным из-за недостаточной для этих целей частоты обновления выходных данных ИИБ.

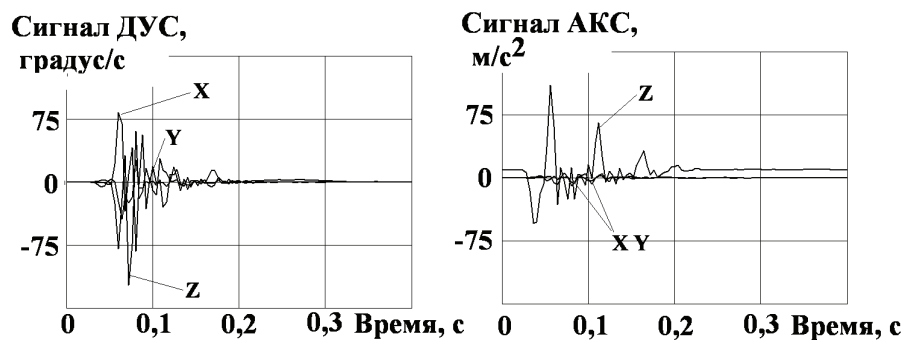


Рис. 3. Записанные при ударе сигналы измерительных каналов ИИБ

Широкополосная случайная вибрация

При испытании оси X и Y ИИБ располагались в плоскости, близкой к горизонтальной. Направление действия вибрации – вдоль оси Z (см. рис. 1). Параметры вибрации: диапазон частоты вибрации 20–2000 Гц; среднеквадратичное значение 20 g; длительность 4 с. Задаваемая на испытательном стенде спектральная плотность ускорения показана на рис. 4.

Среднеквадратичное значение ускорения ШСВ в диапазоне частот 20–2000 Гц, измеренное системой контроля вибрационного стенда, составило 19,94 g. Измерительные каналы ИИБ имеют полосу пропускания 0–100 Гц, поэтому показания акселерометра Z должны соответствовать среднеквадратичному значению ускорения $\sqrt{0,08 \cdot 100} = 2,8g$, где 0,08 – значение спектральной плотности ШСВ для диапазона частот 0–100 Гц; 100 – верх полосы пропускания каналов измерения ускорения. Помимо этого, акселерометр Z измеряет постоянное ускорение силы тяжести.

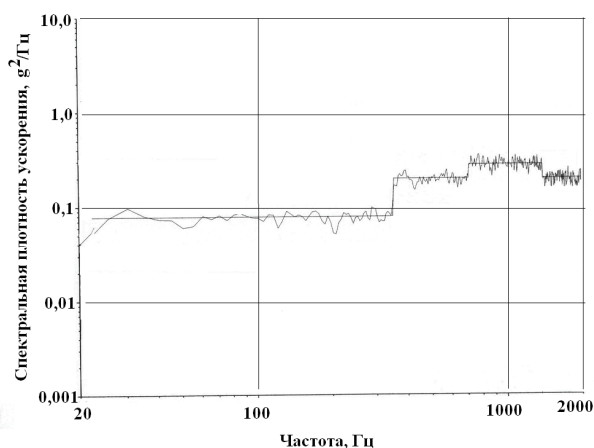


Рис. 4. Спектральная плотность ускорения, измеренная с помощью штатных средств испытательного стенда

Так как угловая скорость при испытаниях не задавалась, то показания каналов измерения угловой скорости должны быть нулевыми (величины проекций угловой скорости вращения Земли на измерительные оси по сравнению с результатами влияния вибрации пренебрежимо малы).

На рис. 5 – графики сигналов измерительных каналов ИИБ, записанные в ходе воздействия ШСВ. Видно, что блок производит измерения и передает потребителю их результаты. Однако результат измерений содержит значительные погрешности (табл. 2, где приведено математическое ожидание нулевых сигналов ИИБ).

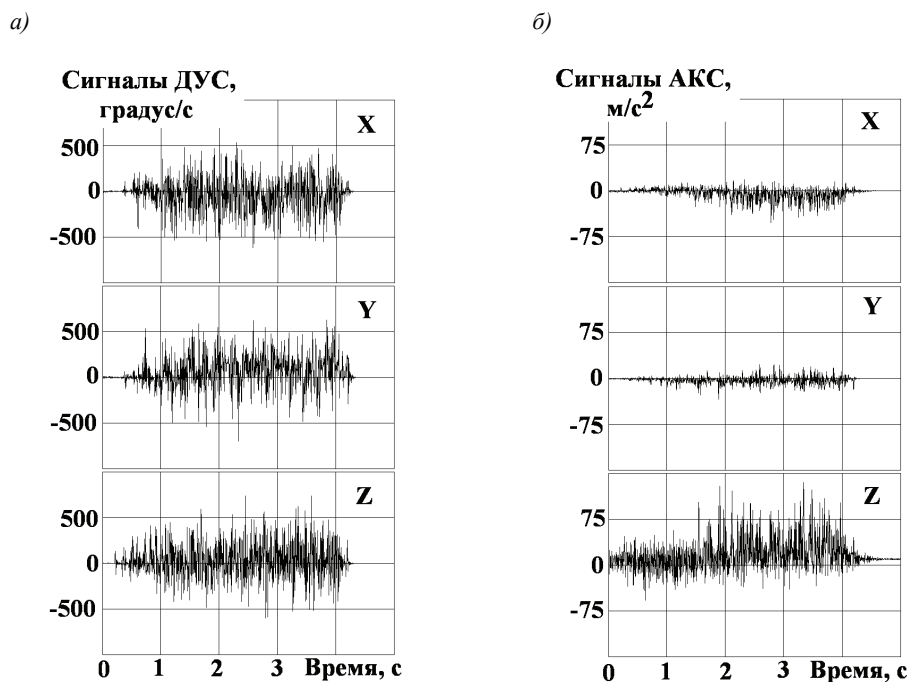


Рис. 5. Сигналы измерительных каналов ИИБ, записанные в ходе воздействия по оси Z ШСВ:

а) сигналы каналов измерения угловой скорости X , Y и Z ;б) сигналы каналов измерения ускорения X , Y и Z

Таблица 2

Математическое ожидание нулевых сигналов ИИБ в условиях воздействия по оси Z ШСВ

Измеряемая величина	Измерительный канал ИИБ		
	X	Y	Z
Угловая скорость, град/с	-34	63	32
Линейное ускорение, м/с^2	-4,6	-2,7	18,0

Видно, что амплитудное значение погрешности в измерении угловой скорости составляет сотни градусов в секунду, а ускорения – десятки метров/с². При этом среднее значение погрешностей достигает ~60 град/с и 1 g соответственно. Причиной столь значительных погрешностей являются вибрационные явления в чувствительных элементах ИИБ, которые не являются предметом данной статьи.

Исследование влияния вибрации на акселерометры и микромеханические датчики угловой скорости приводится в работах [19, 20].

Синусоидальная вибрация

При испытаниях ИИБ подвергался воздействию синусоидальной вибрации по трем осям: сначала по оси Z , затем X и, наконец, Y ; во всех экспериментах оси X и Y ИИБ располагались в плоскости, близкой к горизонтальной. Парамет-

ры вибрации: амплитуда вибрации 10 g; изменение частоты от 20 до 2000 Гц (в одну сторону); скорость изменения частоты две октавы в минуту (соответственно этому время испытаний по каждой оси 199,32 с). Спектр действующего ускорения при вибрации вдоль оси Z показан на рис. 6. Спектры ускорений при вибрации по осям X и Y аналогичны.

На рис. 7, а показаны графики сигналов каналов измерения угловой скорости, на рис. 7, б – ускорения, записанные в ходе воздействия синусоидальной вибрации по оси X, при воздействии вибрации по осям Z и Y картины схожи.

Видно, что в диапазоне частот вибрации 1700–1950 Гц наблюдаются значительные резонансные явления, и показания измерительных каналов содержат погрешности, соизмеримые с диапазоном измерений.

Для канала измерения угловой скорости Z к указанному диапазону добавляется еще один 1150–1250 Гц. В диапазоне частот вибрации 20–1700 Гц также наблюдаются резонансные явления, но уровень максимальных погрешностей ниже и не превышает 5% от диапазона измерений. Для диапазонов частот 20–200 Гц и 200–1700 Гц рассчитаны значения чувствительности математического ожидания нулевых сигналов ИИБ к амплитуде синусоидальной вибрации. Результаты представлены в табл. 3.

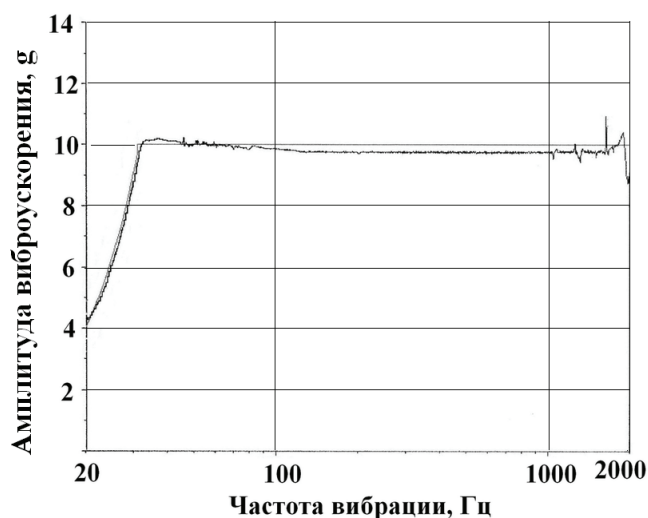


Рис. 6. Спектр виброускорения, полученный с помощью штатных средств испытательного стенда

Таблица 3

Чувствительность математического ожидания нулевых сигналов ИИБ к амплитуде синусоидальной вибрации для различных диапазонов частот

Измерительный канал \ Направление вибрации и диапазон частоты, Гц	По оси X		По оси Y		По оси Z	
	20	200	20	200	20	200
	...	...	...	...	...	...
Измерительный канал	200	1700	200	1700	200	1700
ДУС X, град/ч/g	1,5	0,9	-0,5	-8,2	1,5	4,4
ДУС Y, град/ч/g	-1,8	-14,7	-0,5	-15,6	4,1	-9,2
ДУС Z, град/ч/g	1,5	7,1	-3,0	10,4	2,1	4,2
АКС X, 10^{-3} , м/с ² /g	-3,1	-90,0	0,0	1,4	-0,3	-3,0
АКС Y, 10^{-3} , м/с ² /g	0,0	1,5	6,2	8,4	-1,4	-7,2
АКС Z, 10^{-3} , м/с ² /g	-0,3	-1,9	0,0	-3,6	8,1	91,0

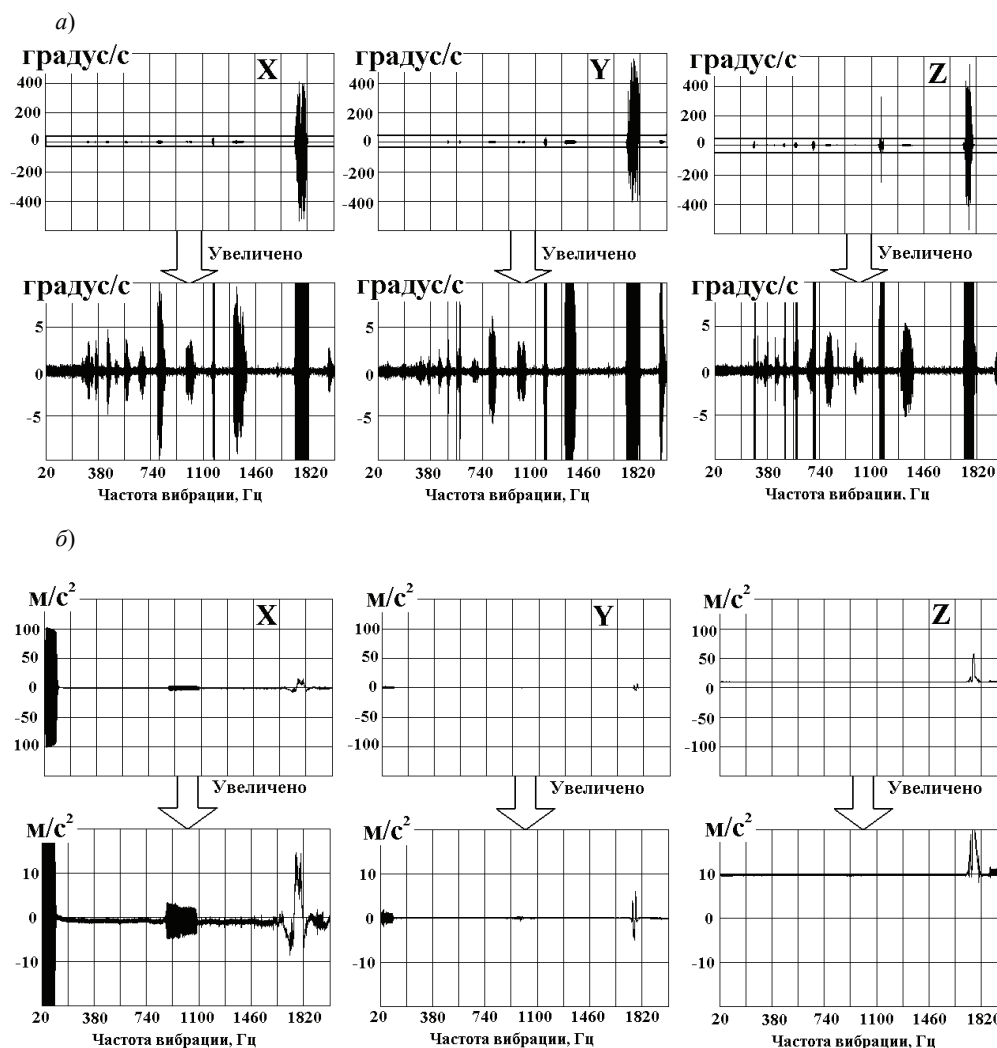


Рис. 7. Записанные в ходе воздействия синусоидальной вибрации по оси X сигналы каналов измерения угловой скорости (а) и линейного ускорения (б)

Можно констатировать, что для диапазона частот вибрации 20–1700 Гц чувствительность каналов измерения угловой скорости к амплитуде синусоидального виброускорения в пределах ± 20 град/ч/г. Для каналов измерения ускорения: при воздействии вибрации по перекрестным осям в пределах $\pm 10^{-2}$ м/с²/г, при воздействии вибрации по измерительной оси $\pm 10^{-1}$ м/с²/г.

Анализ влияния ударов и вибраций на характеристики блока

В табл. 4 сопоставляются основные характеристики измерительных каналов ИИБ до испытаний на удар и вибрации и после. Характеристики «Максимальная погрешность коэффициента передачи» и «Максимальная неортогональность измерительных осей» определены с использованием оборудования и методик разработчика и изготовителя блока. Характеристика «Нестабильность нуля в запуске» вычислена с использованием программы для ПЭВМ [21], а «Нестабильность нуля от включения к включению» – с использованием программы MathCad.

**Сопоставление основных характеристик измерительных каналов ИИБ
до испытаний на удар и вибрацию и после**

Параметр	Значение до испытаний	Значение после испытаний	Паспортное значение [5, 22]
Каналы измерения угловой скорости			
Нестабильность нуля от включения к включению (1 σ), град/ч	30	30	50
Нестабильность нуля в запуске (1 σ по вариации Алана), град/ч	14	20	15
Максимальная погрешность коэффициента передачи, %	0,01	0,05	(1 σ) 0,05
Максимальная неортогональность измерительных осей, угл. мин	0,3	1,4	<10
Каналы измерения линейного ускорения			
Нестабильность нуля от включения к включению (1 σ), mg	5,3	6,6	Не указано
Нестабильность нуля в запуске (1 σ по вариации Алана), mg	2,0	2,3	2,0
Максимальная погрешность коэффициента передачи, %	0,05	0,06	(1 σ) 0,05
Максимальная неортогональность измерительных осей, угл. мин	4,8	7,2	<10

Из таблицы следует, что в результате воздействия удара, ШСВ и синусоидальной вибрации точность измерительных каналов ухудшилась. В то же время, несмотря на то что величины воздействующих факторов в несколько раз превышали максимально допустимые, погрешность коэффициента передачи и неортогональность измерительных осей остались в пределах паспортных значений. Нестабильность нуля от включения к включению для каналов измерения угловой скорости также осталась в пределах паспортных значений, а для каналов измерения ускорения данную характеристику сопоставить не удалось, так как в паспорте она отсутствует. Нестабильность нуля в запуске не только ухудшилась, но и превысила паспортную на 15%.

Заключение

Анализ паспортных характеристик и результатов испытаний показал:

1) характеристики инерциального измерительного блока АИСТ-350Т соответствуют заявленным в паспорте;

2) условия, при которых блок отвечает требованиям вибрационной устойчивости: широкополосная случайная вибрация в диапазоне частот (20...2000)Гц, со среднеквадратичным значением 5g, направление вдоль любой оси.

Условия, при которых блок отвечает требованиям вибрационной прочности:

– широкополосная случайная вибрация в диапазоне частот 20...2000 Гц, со среднеквадратичным значением 20 g, длительностью 4 с, направлением вдоль оси Z;

– синусоидальная вибрация в диапазоне частот 20...2000 Гц, амплитуда 10 g, длительность 200 с (последовательно по каждой оси), направление вдоль любой оси.

Наиболее критичным воздействием на блок является вибрация в диапазоне частот 1700...1900 Гц, при которой наблюдаются резонансные явления, и показания измерительных каналов содержат погрешности сопоставимые с диапазоном измерений;

3) условия, при которых блок отвечает требованиям ударной у с т о й ч и в о с т и: механический удар с пиковым ускорением 100 g, длительность импульса 0,005 с;

4) условия, при которых блок отвечает требованиям ударной п р о ч н о с т и: механический удар с пиковым ускорением 100 g, длительность импульса 0,002 с, время достижения максимального значения 0,001 с, направление вдоль оси Z.

Ударное воздействие приводит к затухающим в течение 0,4 с колебательным процессам в сигналах блока.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.atlanticinertial.com/uploads/pdfs/4232-SiIMU02low.pdf>
2. <http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/>
3. <http://www.systron.com/imus/>
4. **Habibi S.** Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor. URL: <http://www.colibrys.com>.
5. <http://isense.ru/ru/index/>
6. <http://www.elektropribor.spb.ru/>
7. <http://www.gyro.ru/>
8. **ГОСТ 16504-81.** Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2003. – 26 с.
9. **Мезенцев, А.П.** Среднеточная ИНС «АИСТ-320» с кориолисовым вибрационным гироскопом «АИСТ-100». Идеология и результаты разработки, производства и испытаний / А.П. Мезенцев [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2007. – №3 (58). – С. 3-19.
10. **ГОСТ 15150-69.** Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2006. – 59 с.
11. **ГОСТ 28203-89.** Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания. Испытание Fc и руководство: вибрация (синусоидальная). – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2006. – 23 с.
12. **ГОСТ 24346-80.** Вибрация. Термины и определения. – М.: Госкомитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1980. – 34 с.
13. **ГОСТ 26883-86.** Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1992. – 10 с.
14. **ГОСТ 30630.0.0-99.** Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. – Минск: Межгосударственный совет по стандартам, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 2000. – 28 с.
15. **ГОСТ 28231-89.** Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания. Крепление элементов, аппаратуры и других изделий в процессе динамических испытаний, включая удар (EA), многократные удары (EB), вибрацию (FC и FD), линейное ускорение (GA) и руководство. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2006. – 15 с.
16. **ГОСТ 30630.1.2-99.** Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. – Минск: Межгосударственный совет по стандартам, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 2000. – 27 с.
17. **ГОСТ 28220-89.** Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Fd: широкополосная случайная вибрация. Общие требования. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2006. – 16 с.

18. **ГОСТ Р 51371-99.** Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие ударов. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1995.- 28 с.
19. **Коновалов, С.Ф.** Теория виброустойчивости акселерометров // М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
20. **Евстифеев, М.И.** Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2013. - №1 (80).- С. 119-133.
21. **AlaVar 5.2:** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alamath.com>
22. **Прибор АИСТ-350.** Паспорт СВМК.402132.006 ПС. Редакция 1-2010.

Abstract. The article presents the results of testing of the inertial measurement unit AIST-350T (figure 1) on the impact of a single mechanical shock (figure 2), broad-band and sinusoidal vibration (figure 4 and 6). Magnitude of vibration at times exceed the permissible levels. During all the tests recorded signals of channels (figure 3, 5, 7). The analysis of the measurement channel errors (table 1, 2 and 3). The material will be useful for developers of inertial measurement units and navigation systems based on them.

Key words: Inertial measurement unit, bench tests, mechanical shock, vibration, measurement channel errors

Материал поступил 01.07.13