

УДК 629.7.05

Качественный анализ воздействия вибраций на микромеханические инерциальные датчики

Дегтярёв И. О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы и приборы ориентации, навигации и стабилизации»
Россия, 127018, г. Москва, АО «ЦНИИ Автоматики и Гидравлики»*

Зиновьев П. Д., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы и приборы ориентации, навигации и стабилизации»
Россия, 127018, г. Москва, АО «ЦНИИ Автоматики и Гидравлики»*

Измайлов-Перкин А. В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы и приборы ориентации, навигации и стабилизации»
Россия, 127018, г. Москва, АО «ЦНИИ Автоматики и Гидравлики»*

Научный руководитель: Шевцова Е.В., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Системы и приборы ориентации, навигации и стабилизации»
bauman@bmstu.ru*

1. Техническое описание ИИБ АИСТ-350

Прибор АИСТ-350 предназначен для определения проекций угловых скоростей и линейных ускорений в связанной системе координат объекта и выдачи информации потребителю в цифровом виде.

АИСТ-350 представляет собой миниатюрный трехосный инерциальный измерительный блок, построенный на базе MEMS гироскопов LPY510 (STMicroelectronics), MEMS акселерометров ADXL-326 (Analog Devices) и необходимой сервисной электроники. Выходные данные прибора термокомпенсированы для всего рабочего диапазона температур. Поскольку температурная зависимость чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров) является сильно нелинейной, для достижения минимальной погрешности в приборе используется табличный алгоритм термокомпенсации нуля и масштабного коэффициента. Для этого после сборки приборов производится калибровка их температурной характеристики в диапазоне от -40 °С до +85 °С.

Основные технические характеристики прибора АИСТ-350 указаны на сайте разработчика [1].

2. Классическая постановка эксперимента

Ранее были опубликованы [2] результаты испытаний подобного прибора на виброустойчивость и вибропрочность с использованием специализированной аппаратуры. Испытания проводились в три этапа.

Первый этап - воздействие на инерциальный измерительный блок (ИИБ) одиночного механического удара (пиковое ударное ускорение 100 g, длительность импульса 2 мс, с временем достижения максимального значения 1 мс).

Второй этап – широкополосная случайная вибрация (диапазон частоты вибрации – 20-2000 Гц, среднеквадратичное значение 20 g, длительность 4 с).

Третий этап – синусоидальная вибрация (амплитуда вибрации 10 g, изменение частоты от 20 до 2000 Гц, скорость изменения частоты две октавы в минуту).

На первых двух этапах направление действия вибрации – вдоль оси Z. На третьем этапе ИИБ подвергался воздействию вибрации последовательно по трем осям. При этом, во всех экспериментах оси X и Y ИИБ располагались в плоскости, близкой к горизонтальной.

В табл. 1 сопоставляются основные характеристики измерительных каналов ИИБ до испытаний на удар и вибрации и после.

Таблица 1

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

Параметр	Значение до испытаний	Значение после испытаний	Паспортное значение
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 (1σ), mg	5.3	6.6	не указано
Нестабильность нуля в запуске (1σ по вариации Алана), mg	2.0	2.3	2.0
Максимальная погрешность коэффициента передачи, %	0.05	0.06	(1σ) 0.05
Максимальная неортогональность измерительных осей, угл.мин.	4.8	7.2	<10

Анализ паспортных характеристик и результатов показал:

1. Характеристики ИИБ АИСТ-350Т соответствуют заявленным в паспорте [1];
2. Условия, при которых блок отвечает требованиям вибрационной устойчивости: широкополосная случайная вибрация в диапазоне частот (20..2000) Гц, со среднеквадратичным значением 5 g, направление вдоль любой оси.

3. Методика проведения

Целью данной работы было создание методики проведения эксперимента по воздействию широкополосной случайной вибрации на ИИБ АИСТ-350 с последующей качественной оценкой результатов испытаний.

Опытный образец (рис. 1) – инерциальный измерительный блок 1, жестко закреплен в корпусе из пластика 2, таким образом, что оси чувствительности чувствительного элемента (ЧЭ) направлены по осям связанного трехгранника $OX_B Y_B Z_B$ (оси X_B , Y_B , Z_B являются соответственно продольной, боковой и нормальной строительными осями объекта). В свою очередь, корпус прибора 2 жестко связан с четырехколесной тележкой (без амортизации) 3, при помощи штифтов, способной двигаться исключительно прямолинейно. Помимо ИИБ корпус прибора 2 содержит аккумуляторную батарею 6 для питания электроники, входящей в состав изделия, приемник GPS 4, блок электроники 5 для коммутации с ЭВМ, а так же выходные разъемы.

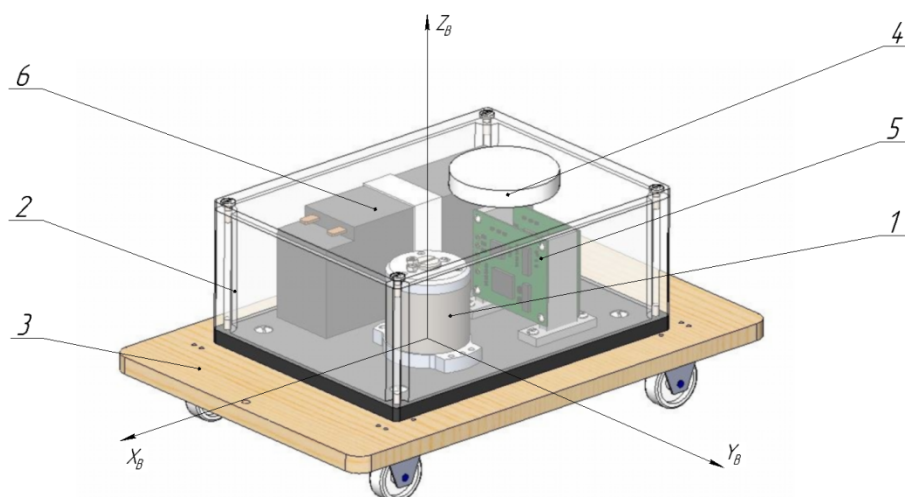


Рис. 1. Опытный образец

Перед началом испытаний проводится начальная выставка ИНС в течение 120 с, после чего тележка приводится в движение и осуществляется съем выходных данных с ИИБ (кажущиеся ускорения, абсолютные угловые скорости).

Выходные данные с ИИБ с частотой 50 Гц поступают на ЭВМ через COM-порт, где осуществляется их последующая обработка. На выходе приемника GPS - данные со спутника о координатах и скорости движения приемника, передаваемые с частотой 1 Гц (информация о данной скорости используется при испытаниях как эталонная), а также информация о количестве спутников, находящихся в данный момент в зоне видимости.

Предполагалось, что при движении тележки по поверхностям с разными геометрическими параметрами их неровностей амплитуда и частота вибраций также будут разными (рис. 2а, 2б, 2в).

Испытания проводились на следующих поверхностях: покрытие в здании, резиновое покрытие, асфальт, грунт, а так же вдоль и поперек уличной плитки (рис. 2а, 2б, 2в). Отличие экспериментов, проводившихся вдоль и поперек плитки, состояло в том, что при движении тележки вдоль плитки возникали диагональные колебания, а при движении поперек плитки – преимущественно продольные.

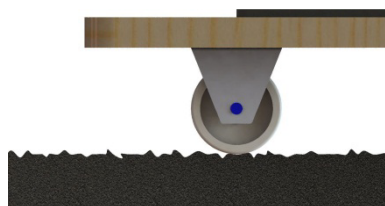


Рис. 2а. Асфальт

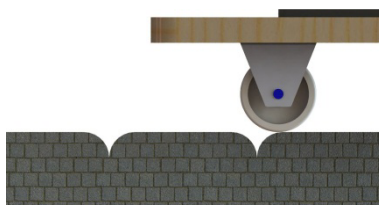


Рис. 2б. Плитка

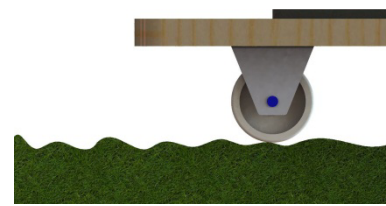


Рис. 2в. Грунт

Данное предположение корректно в случае, если скорость движения тележки будет одинаковой во время всех экспериментов, что и было осуществлено на практике – скорость движения контролировалась в реальном времени по показаниям GPS (средняя величина скорости составляла 1,1 м/с). Исключение составил эксперимент в здании, во время которого коррекция по GPS отсутствовала, ввиду недостаточного количества видимых спутников.

Достоинствами предложенного метода является простота проведения эксперимента и отсутствие необходимости в использовании точных лабораторных вибростендов, что в свою очередь уменьшает трудозатраты на испытания.

Основной недостаток – невозможность проведения испытаний при нулевой скорости движения тележки относительно поверхности Земли (при нулевой скорости требуемые вибрации принципиально не возникают при данной постановке задачи).

4. Покоящийся ИИБ

В режиме «Выставка» на выходе ИИБ наблюдается случайный процесс (рис. 3) с характеристиками, указанными в табл. 2.

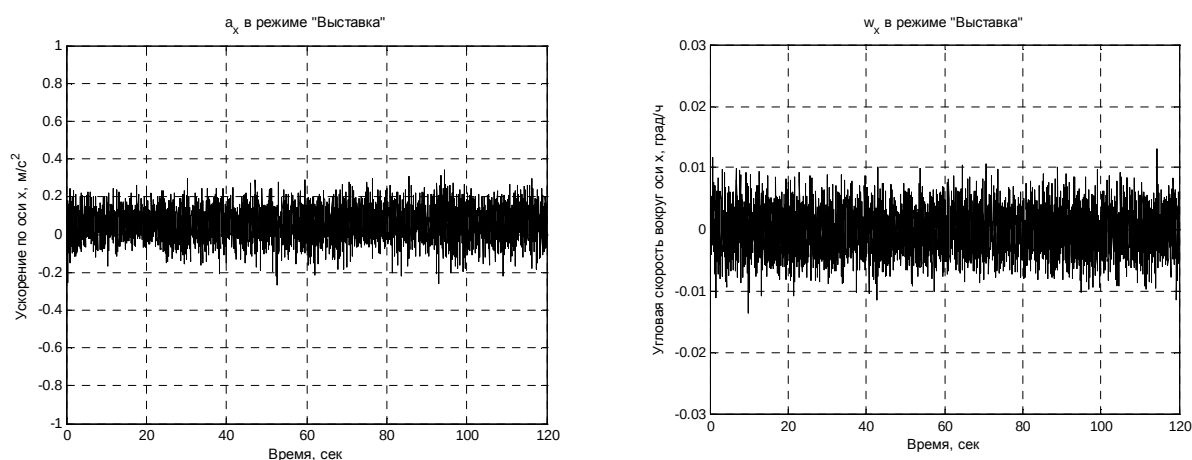


Рис. 3. Линейное ускорение по оси x и угловая скорость вокруг оси x в режиме «Выставка»

Статистические характеристики сигналов ЧЭ в режиме «Выставка»

Покрытие	Ось	$M(a), [м/с^2]$	$M(\omega), [рад/с]$	$D(a), [м/с^2]$	$D(\omega), [рад/с]$
На ковре	X	$5,71 \cdot 10^{-2}$	$-19,88 \cdot 10^{-5}$	$6,03 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
	Y	$5,00 \cdot 10^{-2}$	$-49,99 \cdot 10^{-5}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-5}$
	Z	$981,43 \cdot 10^{-2}$	$-12,31 \cdot 10^{-5}$	$6,68 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$
На резиновом покрытии	X	$-5,56 \cdot 10^{-2}$	$-14,32 \cdot 10^{-5}$	$7,74 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$
	Y	$11,84 \cdot 10^{-2}$	$-69,16 \cdot 10^{-5}$	$5,56 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$
	Z	$981,65 \cdot 10^{-2}$	$-13,56 \cdot 10^{-5}$	$8,46 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$
На асфальте	X	$-16,85 \cdot 10^{-2}$	$-20,51 \cdot 10^{-5}$	$5,07 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$
	Y	$-16,77 \cdot 10^{-2}$	$-69,02 \cdot 10^{-5}$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$
	Z	$981,32 \cdot 10^{-2}$	$-0,38 \cdot 10^{-5}$	$5,68 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$
На плитке (вдоль)	X	$-46,94 \cdot 10^{-2}$	$-31,26 \cdot 10^{-5}$	$6,01 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$
	Y	$-4,31 \cdot 10^{-2}$	$-58,86 \cdot 10^{-5}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$
	Z	$980,91 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-5}$	$6,35 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$
На грунте	X	$27,75 \cdot 10^{-2}$	$-34,75 \cdot 10^{-5}$	$6,16 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$
	Y	$-24,93 \cdot 10^{-2}$	$-51,60 \cdot 10^{-5}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$
	Z	$981,14 \cdot 10^{-2}$	$-1,56 \cdot 10^{-5}$	$4,25 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$
На плитке (поперек)	X	$14,42 \cdot 10^{-2}$	$-28,52 \cdot 10^{-5}$	$9,65 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$
	Y	$-30,72 \cdot 10^{-2}$	$-58,43 \cdot 10^{-5}$	$7,73 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
	Z	$981,28 \cdot 10^{-2}$	$2,59 \cdot 10^{-5}$	$8,48 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$
Средние значения по выставкам	X	-	-	$6,78 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$
	Y	-	-	$5,11 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$
	Z	-	-	$6,65 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$

Данные характеристики будем считать исходными, так как в режиме «Выставка» ИИБ неподвижен, и шумы, которые имеются на выходе датчиков первичной информации, являются собственными шумами гироскопов и акселерометров, что позволяет нам определить уровень их ошибок.

5. Статистические характеристики показаний ЧЭ при вибрациях

При возникновении вибраций происходит разброс статистических характеристик по сравнению с данными, полученными при выставке прибора на том же покрытии (рис. 4).

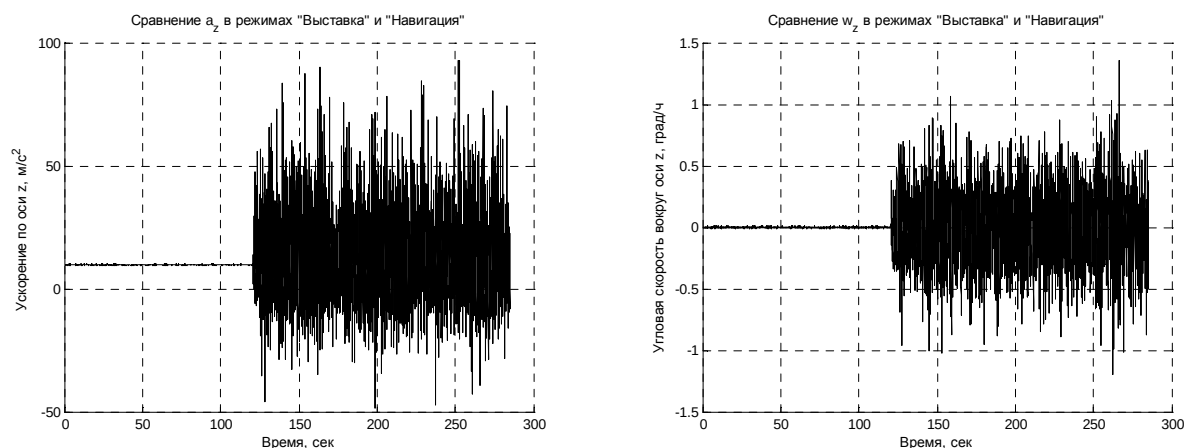


Рис. 4. Сравнение сигналов в режимах «Выставка» и «Навигация» для акселерометра и гироскопа по вертикальной оси (режим «Выставка» длится 120 секунд)

Анализ результатов испытаний показал, что, в соответствии с предположением, при движении по разным поверхностям параметры вибраций различны и интенсивность вибраций напрямую влияет на выходные данные чувствительных элементов (табл. 3).

Таблица 3

Статистические характеристики показаний ЧЭ при вибрациях

Покрытие	Ось	$M(a), [м/с^2]$	$M(\omega), [рад/с]$	$D(a), [м/с^2]$	$D(\omega), [рад/с]$
На ковре	X	$6,46 \cdot 10^{-3}$	$-7,90 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{-1}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$
	Y	$-10,42 \cdot 10^{-3}$	$-11,59 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \cdot 10^{-1}$	$2,60 \cdot 10^{-2}$
	Z	$9808,79 \cdot 10^{-3}$	$6,63 \cdot 10^{-4}$	$64,91 \cdot 10^{-1}$	$7,12 \cdot 10^{-2}$
На резиновом покрытии	X	$-2,05 \cdot 10^{-3}$	$-12,20 \cdot 10^{-4}$	$5,27 \cdot 10^{-1}$	$5,13 \cdot 10^{-2}$
	Y	$-14,34 \cdot 10^{-3}$	$-23,59 \cdot 10^{-4}$	$8,59 \cdot 10^{-1}$	$9,17 \cdot 10^{-2}$
	Z	$9833,86 \cdot 10^{-3}$	$543,83 \cdot 10^{-4}$	$200,54 \cdot 10^{-1}$	$2,70 \cdot 10^{-2}$
На асфальте	X	$-24,91 \cdot 10^{-3}$	$-19,67 \cdot 10^{-4}$	$43,34 \cdot 10^{-1}$	$3,62 \cdot 10^{-2}$

	Y	$-71,50 \cdot 10^{-3}$	$-41,93 \cdot 10^{-4}$	$15,80 \cdot 10^{-1}$	$12,39 \cdot 10^{-2}$
	Z	$9752,12 \cdot 10^{-3}$	$11,56 \cdot 10^{-4}$	$458,13 \cdot 10^{-1}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$
На плитке (вдоль)	X	$-215,94 \cdot 10^{-3}$	$-29,25 \cdot 10^{-4}$	$43,90 \cdot 10^{-1}$	$7,51 \cdot 10^{-2}$
	Y	$-44,13 \cdot 10^{-3}$	$-11,68 \cdot 10^{-4}$	$22,83 \cdot 10^{-1}$	$20,18 \cdot 10^{-2}$
	Z	$9794,84 \cdot 10^{-3}$	$-28,58 \cdot 10^{-4}$	$603,75 \cdot 10^{-1}$	$3,89 \cdot 10^{-2}$
На грунте	X	$-189,52 \cdot 10^{-3}$	$-18,82 \cdot 10^{-4}$	$47,16 \cdot 10^{-1}$	$36,25 \cdot 10^{-2}$
	Y	$-57,31 \cdot 10^{-3}$	$4,68 \cdot 10^{-4}$	$46,08 \cdot 10^{-1}$	$80,91 \cdot 10^{-2}$
	Z	$9811,59 \cdot 10^{-3}$	$4,31 \cdot 10^{-4}$	$720,83 \cdot 10^{-1}$	$13,75 \cdot 10^{-2}$
На плитке (поперек)	X	$3,91 \cdot 10^{-3}$	$9,20 \cdot 10^{-4}$	$163,58 \cdot 10^{-1}$	$22,68 \cdot 10^{-2}$
	Y	$-100,18 \cdot 10^{-3}$	$-105,07 \cdot 10^{-4}$	$70,57 \cdot 10^{-1}$	$47,39 \cdot 10^{-2}$
	Z	$10028,48 \cdot 10^{-3}$	$-7,52 \cdot 10^{-4}$	$1863,75 \cdot 10^{-1}$	$6,14 \cdot 10^{-2}$

6. Спектральная плотность мощности сигналов

В результате анализа данных от ИИБ были получены спектральные плотности (СП) вибраций. На графиках СП сигналов акселерометров в большинстве случаев имеются две ярко выраженные частоты. Одна из них (около 0,3 Гц) может быть охарактеризована «толчками» тележки (рис. 5). Данное предположение имеет место, так как особенно эта частота выражена на графике СП сигнала от акселерометра, с осью чувствительности, направленной по продольной оси. Другая частота (около 17,5 Гц) – неопределенный шум, который появлялся на всех покрытиях. Это явление может быть вызвано биением колес.



Рис. 5. Нормированная спектральная плотность ускорения a_x

В сигнале акселерометра вертикального канала наблюдается наличие лишь одной гармоники на частоте около 0.3 Гц (рис. 6).

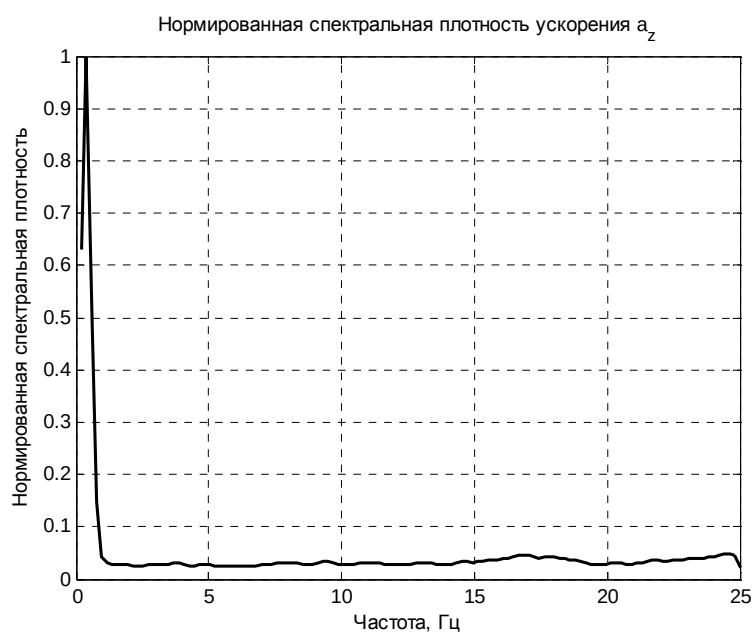


Рис. 6. Нормированная спектральная плотность ускорения a_z

По графику СП угловой скорости вокруг вертикальной оси (ω_z) видно, что по мере возрастания интенсивности вибрации частота около 5 Гц становится более явной (на грунте (рис. 8), по сравнению с ковром (рис. 7), толчки тележки становятся менее

заметными на фоне рыскания тележки, возникающего при наезде на более грубые неровности).

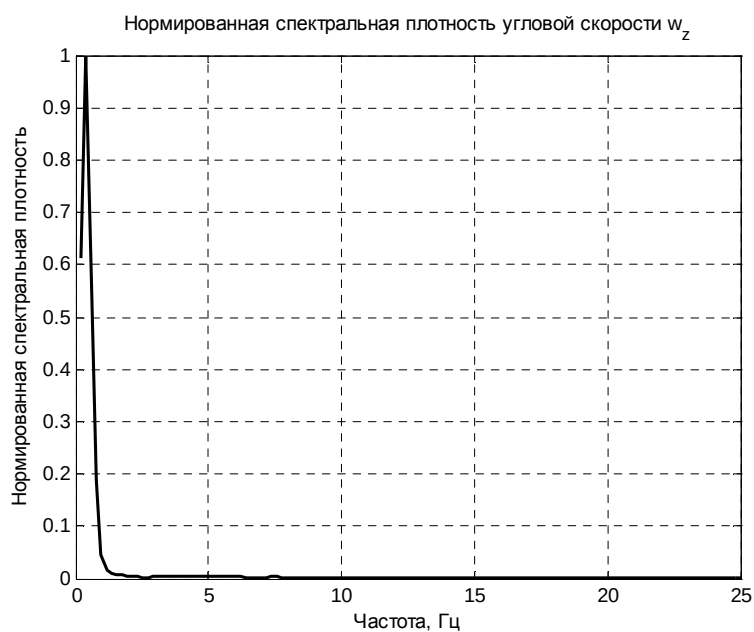


Рис. 7. Нормированная спектральная плотность угловой скорости ω_z на ковре

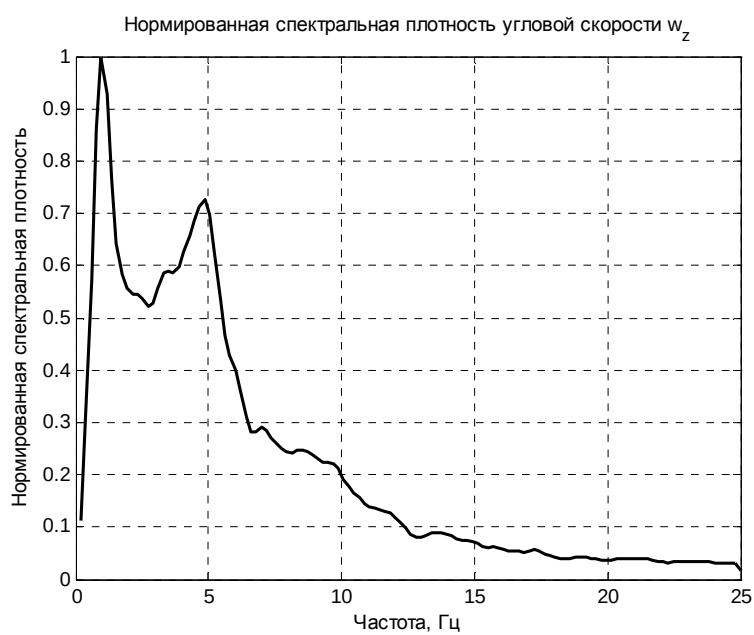


Рис. 8. Нормированная спектральная плотность угловой скорости ω_z на грунте



Рис. 9. Нормированная спектральная плотность угловой скорости ω_x

7. Автокорреляционный функции

По данным экспериментов были построены автокорреляционные функции сигналов датчиков (рис. 10, 11). В результате можно сказать, что дисперсии сигналов возрастают с увеличением амплитуды и частоты сигналов (о чем был также сделан вывод ранее, в п. 5).

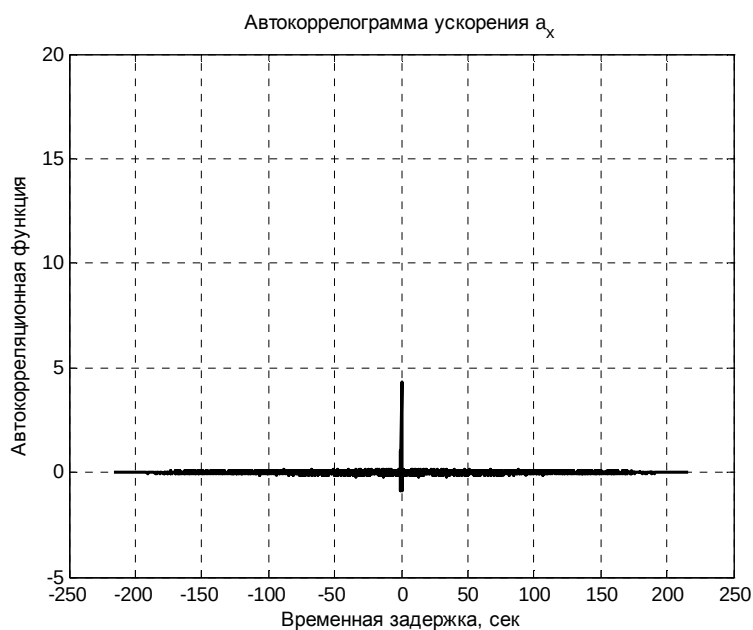


Рис. 10. График автокорреляционной функции ускорения a_x на асфальте

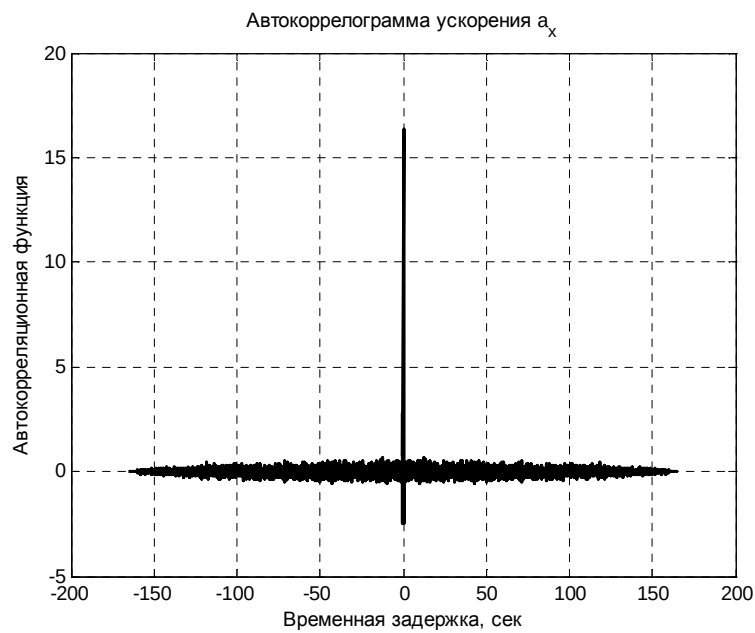


Рис. 11. График автокорреляционной функции ускорения a_x на плитке (поперёк)

Также по нормированным графикам видно, что в некоторых случаях существует некая зависимость между сигналами через определенные промежутки времени. Это связано с тем, что при движении по неровному покрытию (например, грунт), через некоторые промежутки времени вибрации могут повторяться с той же амплитудой и частотой (рис. 12). Также в ходе экспериментов на резиновом покрытии и на ковровом покрытии в здании происходили повороты тележки, что повлияло на показания курсового гироскопа и вид автокорреляционной функции (рис. 13):

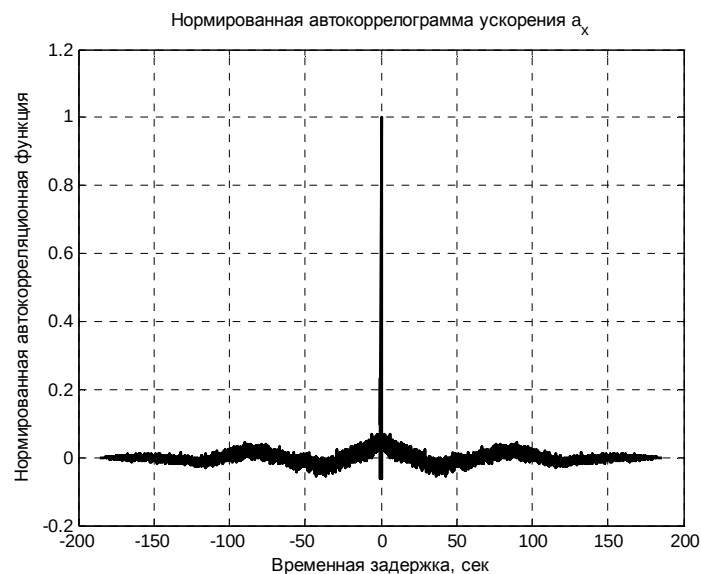


Рис. 12. График автокорреляционной функции ускорения a_x на грунте

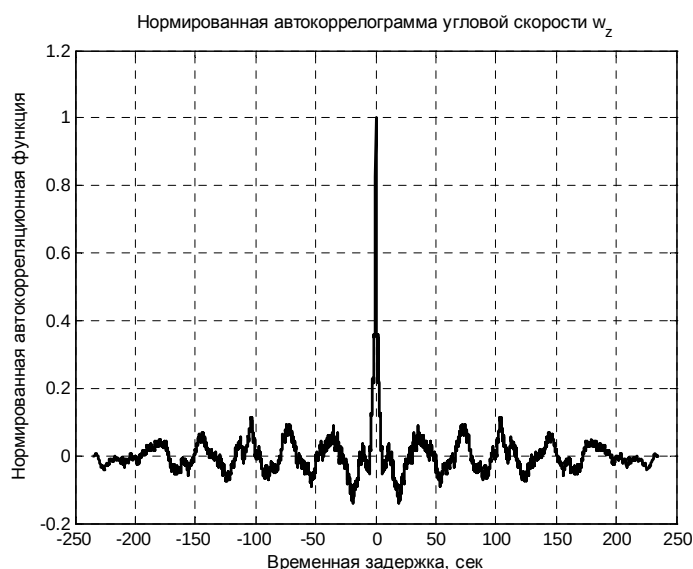


Рис. 13. График автокорреляционной функции ускорения ω_z на резиновом покрытии

8. Анализ влияния длины выборки на вид корреляционной функции

Известно, что вид корреляционной функции существенно зависит от длины выборки случайного процесса, тем более при малых интервалах измерений. Было решено продемонстрировать эту зависимость на экспериментальных данных.

На графиках (рис. 14) показаны автокорреляционные функции одного и того же сигнала с разными длинами выборок: 50 и 170 сек. По графикам видно, что точность вычисления корреляционной функции, существенным образом зависит от длины реализации. Чем больше длина реализации, тем точнее корреляционная функция.

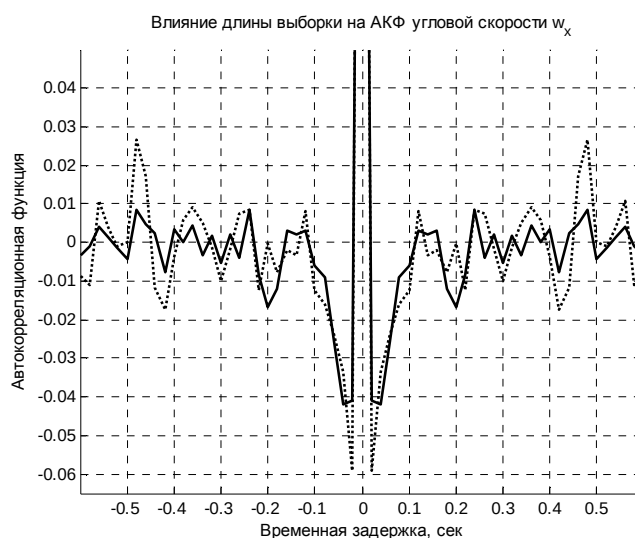


Рис.14. Влияние длины выборки на вид АКФ (точечная линия - график с меньшей длиной выборки, сплошная линия – график с большей длиной выборки)

9. Взаимные корреляционные функции

По данным эксперимента также были построены графики взаимных корреляционных функций (ВКФ). По графикам (рис. 15) видно, что наибольшие пики имеют место для комбинаций $a_x - \omega_y$ и $a_y - \omega_x$, что связано с кинематикой движения объекта. Линейные перемещения по оси ОХ соответствуют угловым перемещениям по оси ОУ и, соответственно, угловые перемещения по оси х соответствуют линейным перемещениям по оси у.

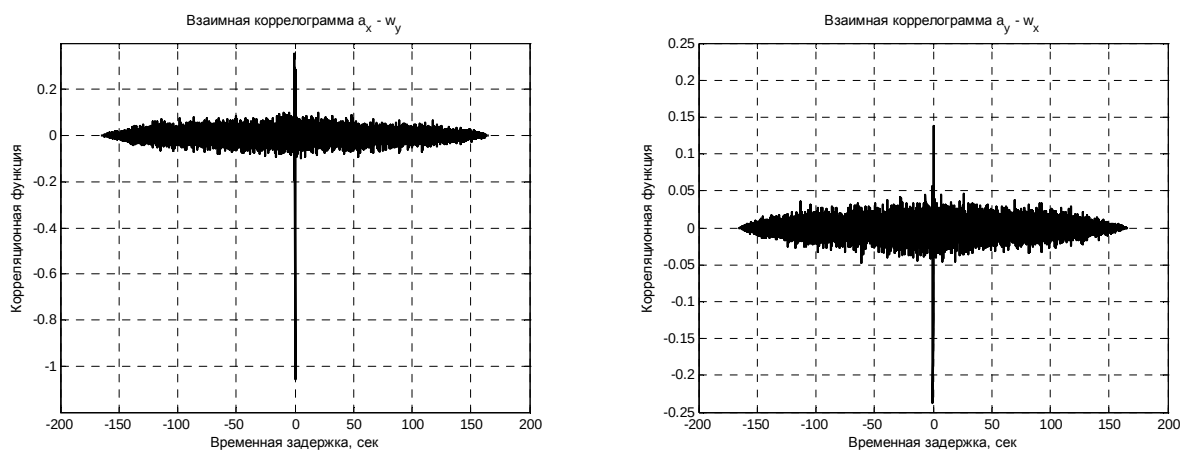


Рис. 15. Графики взаимных корреляционных функций для комбинаций $a_x - \omega_y$, $a_y - \omega_x$ при движении по плитке (поперёк)

На графиках ВКФ $\omega_x - \omega_y$ (рис. 16) на различных покрытиях наблюдается пиковое значение при нулевом временном сдвиге, что может быть объяснено попеременным попаданием колес тележки во впадины в определенные моменты времени и, соответственно, синфазным изменением угловых перемещений по соответствующим осям.

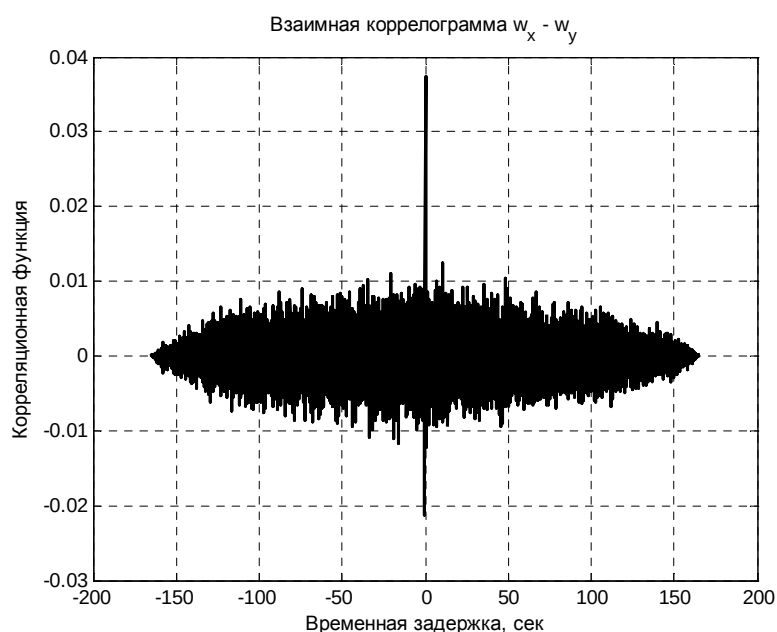


Рис. 16. График взаимной корреляционной функции для комбинации $\omega_x - \omega_y$

Заключение

Микромеханические датчики, в большинстве случаев их применения, испытывают на себе воздействие вибраций, от чего в значительной степени изменяются их параметры. Данное исследование было направлено на качественную оценку влияния вибраций на ИИБ АИСТ-350. В результате можно сказать, что вибрации приводят к многократному увеличению дисперсии, и среднеквадратического отклонения сигнала, изменяется математическое ожидание, что, следовательно, будет приводить к ошибкам в определении координат объекта и его ориентации. Результаты анализа приведены в таблице 4. В дальнейшем планируется исследование и сравнение аналогичных характеристик для других блоков на микромеханических датчиках.

Таблица 4

Статистические характеристики показаний ЧЭ при вибрациях различной интенсивности

Покрытие	Ось	$D(a, [м/с^2])$	$D(\omega, [м/с])$	Интенсивность вибрации
На ковре	Y	0,2507	$2,60 \cdot 10^{-2}$	слабая
На резиновом покрытии	Y	0,8587	$9,17 \cdot 10^{-2}$	слабая
На асфальте	Y	1,5796	$12,39 \cdot 10^{-2}$	умеренная
На плитке (вдоль)	Y	2,2830	$20,18 \cdot 10^{-2}$	умеренная
На грунте	Y	4,6076	$80,91 \cdot 10^{-2}$	сильная
На плитке (поперек)	Y	7,0574	$47,39 \cdot 10^{-2}$	сильная

Список литературы

1. Библиотека технической документации к изделиям компании ООО «Айсенс». Режим доступа <http://www.isense.ru/materialyi/> (дата обращения 20.11.2014).
2. Богданов М.Б. Результаты исследовательских испытаний инерциального измерительного блока АИСТ-350Т на стойкость к механическим воздействиям // Гироскопия и навигация. 2013. № 4 (83). С. 84-93.
3. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. В 2 ч. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. 2-е изд., исп. и доп. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2010. 509 с.