

УДК 531.76/77:629.76/.78

А. Л. Макаров¹, В. Л. Тихонов¹, А. В. Волошин², А. В. Храпач²

¹ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» імені М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

² Науково-виробничий комплекс «Інформаційні технології», Дніпропетровськ

КАЛИБРОВКА БЛОКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО МЭМС-ТЕХНОЛОГИИ

Запропонована методика калібрування чутливого елемента, що входить до складу блока вимірювання параметрів руху. На основі розробленої методики та отриманих калібрувальних характеристик для кожного вимірювального каналу проведено калібрування блока вимірювання параметрів руху. Блок встановлено на одну з ракет-носіїв розробки ДП «КБ «Південне» для подальшого запуску.

В блоке измерения параметров движения (БИПД) в качестве чувствительного элемента используется трехосный чувствительный элемент ADIS-16350 фирмы «Analog Devices» (рис. 1), выполненный по МЭМС-технологии. Элемент ADIS-16350 содержит:

- три датчика угловой скорости (ДУС);
- три акселерометра;
- три датчика температуры.

На основе анализа параметров чувствительных элементов, приводимых в спецификациях разработчиков, структуры математических моделей инерциальных измерителей имеют вид

$$\begin{pmatrix} \omega_x^{\text{ИЗМ}} \\ \omega_y^{\text{ИЗМ}} \\ \omega_z^{\text{ИЗМ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_{nx} \\ \omega_{ny} \\ \omega_{nz} \end{pmatrix} + \mathbf{k}_d - \Delta\mathbf{k}_d \cdot \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_{yT} \\ \delta\omega_z \end{pmatrix} \cdot \Delta T, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a_x^{\text{ИЗМ}} \\ a_y^{\text{ИЗМ}} \\ a_z^{\text{ИЗМ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{nx} \\ a_{ny} \\ a_{nz} \end{pmatrix} + \mathbf{k}_a - \Delta\mathbf{k}_a \cdot \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \delta a_x \\ \delta a_{yT} \\ \delta a_z \end{pmatrix} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

где $\begin{pmatrix} \delta\omega_{xT} \\ \delta\omega_{yT} \\ \delta\omega_{zT} \end{pmatrix}^T$ и $\begin{pmatrix} \delta a_{xT} \\ \delta a_{yT} \\ \delta a_{zT} \end{pmatrix}^T$ — векто-

ры температурного ухода ДУС и акселерометров соответственно, $\mathbf{k}_d, \mathbf{k}_a$ — диагональные матрицы масштабных коэффициентов ДУС и акселерометров соответственно; $\Delta\mathbf{k}_d, \Delta\mathbf{k}_a$ — диагональные матрицы ошибок масштабных коэффициентов ДУС и акселерометров соответственно; ω_{ni}, a_{ni} — смещения нулей ДУС и акселерометров соответственно ($i = x, y, z$); ω_i, a_i — измеряемые сигналы ДУС и акселерометров соответственно ($i = x, y, z$); $\Delta T = T - T_{\text{клб}}$ — разность между температурой, при которой была выполнена калибровка, и текущей температурой чувствительного элемента.

Для данного конкретного чувствительного элемента инструментальные погрешности можно разделить на систематическую (присущую только этому экземпляру чувствительного элемента) и случайную составляющие. Учет систематических составляющих при обработке измерений существенно повышает точность измерения параметров движения.

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

Определение температурной зависимости смещения нуля. Для построения зависимости смещения нуля ДУС и акселерометров от температуры предлагается следующая методика. Блок изме-

© А. Л. МАКАРОВ, В. Л. ТИХОНОВ, А. В. ВОЛОШИН,
А. В. ХРАПАЧ, 2011

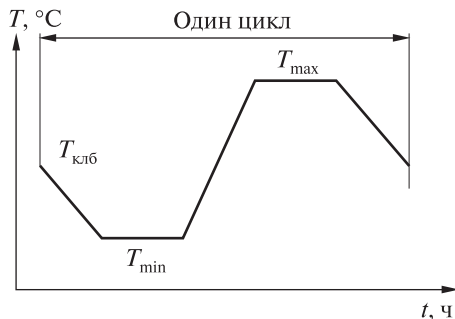


Рис. 2. Цикл термокалибровки

Выходные сигналы измерительных каналов БИПД обрабатываются с помощью адаптивного цифрового фильтра с целью уменьшения шума измерений. По полученным данным с помощью метода наименьших квадратов для каждого цикла строится аппроксимирующая кривая, а также определяется величина смещения нуля при температуре калибровки $T_{клб}$.

Определение масштабного коэффициента. Для определения масштабного коэффициента ДУС используется следующая методика. БИПД помещается на поворотный стол. В качестве эталонного датчика угловой скорости используется волоконно-оптический датчик угловой скорости, ось чувствительности которого выставлена параллельно оси вращения поворотного стола.

При неподвижном поворотном столе в течение интервала времени ΔT_{0i} (i – номер серии) записывается выходной сигнал калибруемого измерительного канала ДУС, ось чувствительности которого выставлена параллельно оси вращения поворотного стола. После этого на поворотном столе выставляется положительное значение угловой скорости, равное половине диапазона измерения ДУС БИПД, и включается вращение. В течение интервала времени ΔT_{ki} записываются выходные сигналы калибруемого канала БИПД и эталонного ДУС. Проводится N таких серий измерений без снятия питания с БИПД.

В каждой серии определяются локальное смещение нуля $\Delta\omega_{0i}$:

$$\Delta\omega_{0i} = \frac{\sum_{j=1}^M \omega_{0j}}{M}$$

и локальное значение масштабного коэффициента $\mu_{\omega i}^+$:

$$\mu_{\omega i}^+ = \frac{\sum_{j=1}^K \omega_{\omega j}}{\sum_{l=1}^K (\omega_{ul} - \Delta\omega_{0i})}$$

где $\omega_{\omega j}$ – выходной сигнал калибруемого канала измерения угловой скорости БИПД в j -й момент времени при неподвижном поворотном столе, M – количество зарегистрированных на интервале ΔT_{0i} значений ω_{0j} , $\omega_{\omega j}$ – выходной сигнал эталонного датчика угловой скорости в j -й момент времени при заданном значении угловой скорости поворотного стола, ω_{uj} – выходной сигнал калибруемого канала измерения угловой скорости БИПД в j -й момент времени при заданном значении угловой скорости поворотного стола, K – количество зарегистрированных на интервале ΔT_{ki} значений $\omega_{\omega j}$ и ω_{uj} .

По полученным значениям рассчитываются среднее значение масштабного коэффициента $\bar{\mu}_{\omega m}^+$ и несмещенная оценка среднего квадратичного отклонения (СКО) значения масштабного коэффициента в запуске $\sigma_{\omega m}^+$ для положительных значений угловой скорости:

$$\bar{\mu}_{\omega m}^+ = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{\omega i}^+}{N}$$

$$\sigma_{\omega m}^+ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{\omega i}^+ - \bar{\mu}_{\omega m}^+)^2}{N-1}}$$

Без снятия питания с БИПД на поворотном столе устанавливается отрицательное значение угловой скорости, равное половине диапазона измерения ДУС БИПД, и включается вращение. Проводится N таких серий измерений без выключения БИПД. По полученным данным рассчитываются среднее значение $\bar{\mu}_{\omega m}^-$ масштабного коэффициента и несмещенная оценка $\sigma_{\omega m}^-$ СКО значений масштабного коэффициента в запуске для отрицательных значений угловой скорости.

Определяются средние значения масштабного коэффициента и СКО масштабного коэффициента в запуске:

$$\mu_{\omega m} = \frac{\mu_{\omega m}^+ + \mu_{\omega m}^-}{2},$$

$$\sigma_{\omega m} = \sqrt{\frac{(\sigma_{\omega m}^+)^2 + (\sigma_{\omega m}^-)^2}{2}}.$$

Снимается питание с БИПД. Через время Δt подается питание на БИПД, и все измерения повторяются. Проводится M таких серий измерений. По результатам измерений рассчитываются:

- среднее значение $\bar{\mu}_{\omega}$ масштабного коэффициента

$$\bar{\mu}_{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_{\omega m}}{M},$$

- среднее значение $\delta\sigma_{\omega}$ СКО масштабного коэффициента в запуске

$$\delta\sigma_{\omega} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (\sigma_{\omega m})^2}{M}},$$

- СКО $\Delta\sigma_{\omega}$ масштабного коэффициента между запусками

$$\Delta\sigma_{\omega} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^M (\bar{\mu}_{\omega m} - \bar{\mu}_{\omega})^2}{M-1}}.$$

Эти измерения проводятся для каждой оси чувствительности (измерительного канала) БИПД.

Аналогичным образом проводится определение масштабных коэффициентов акселерометров. При этом в качестве эталонного значения используется измеренное (рассчитанное) с высокой точностью значение гравитационного ускорения в точке проведения испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Зависимость смещения нуля от температуры.

Экспериментальная зависимость смещения нуля от температуры для одного из измерительных каналов БИПД приведена на рис. 3. Как видно из представленных данных, в выходном сигнале есть значительный шум. С целью увеличения точности получаемых оценок данные о смеще-

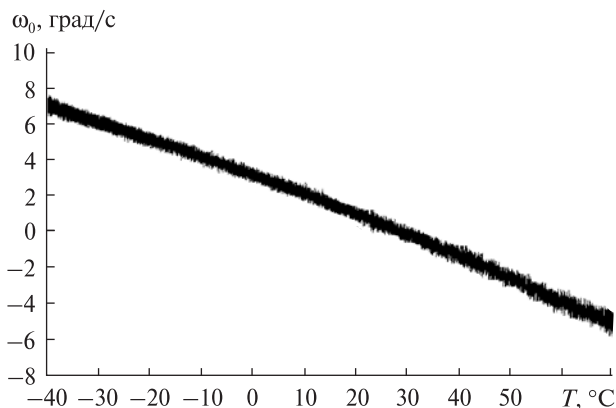


Рис. 3. Смещение нуля в зависимости от изменения температуры до фильтрации

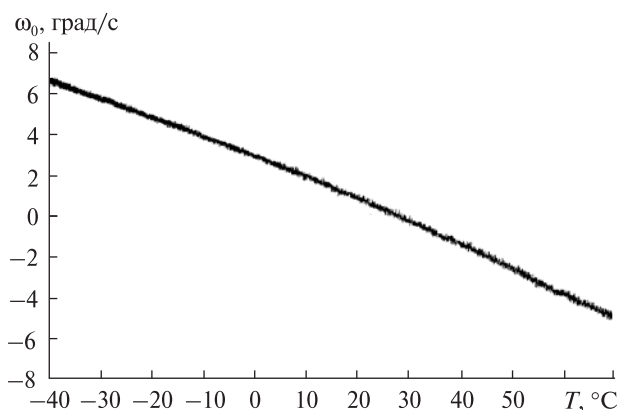


Рис. 4. Смещение нуля в зависимости от изменения температуры после фильтрации

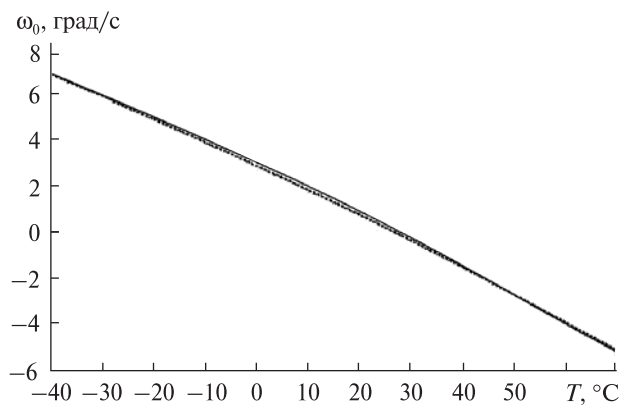


Рис. 5. Аппроксимирующие зависимости смещения нуля от температуры

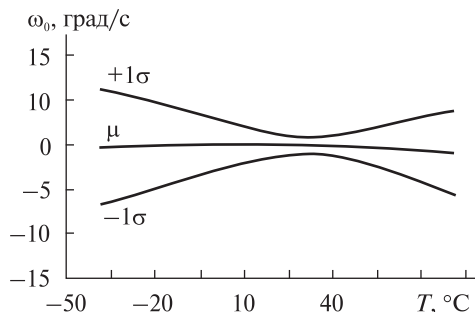


Рис. 6. Типичные значения зависимости смещения нуля от температуры по данным производителя [High precision tri-axis inertial sensor ADIS16350/16355, Rev.A, Analog Devices, Inc.]

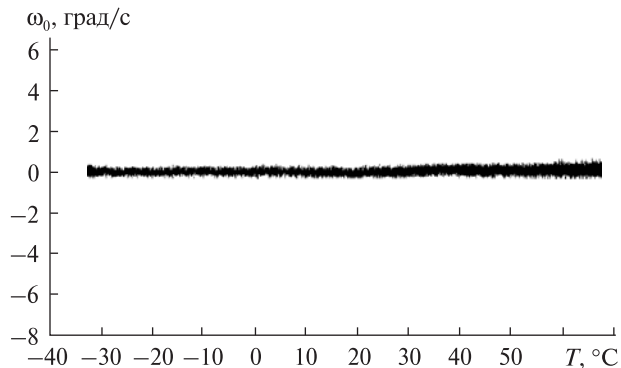


Рис. 7. Смещение нуля в зависимости от изменения температуры после компенсации

Результаты определения смещения нуля и масштабного коэффициента

Номер серии	Угловая скорость	Смещение нуля в запуске, град/с	МК в запуске	СКО МК в запуске
1	+ω	0.0064	1.001952471	0.0005
	-ω	0.0090	0.997651228	0.0004
2	+ω	0.0032	1.001214114	0.0005
	-ω	-0.0083	0.998102662	0.0006
3	+ω	0.0031	1.002149038	0.0005
	-ω	-0.0245	0.998144841	0.0007
4	+ω	-0.0019	1.001414366	0.0005
	-ω	0.0066	0.997758639	0.0005
5	+ω	0.0106	1.001191038	0.0007
	-ω	0.0021	0.997861312	0.0006
6	+ω	-0.0016	1.002352728	0.0004
	-ω	0.0088	0.997556092	0.0005
7	+ω	0.0292	1.000890674	0.0003
	-ω	0.0289	0.997645196	0.0008
8	+ω	0.0122	1.001647884	0.0007
	-ω	0.0329	0.997329588	0.0009
9	+ω	0.0228	1.002153825	0.0007
	-ω	-0.0030	0.997878076	0.0009
10	+ω	-0.0080	1.001652822	0.0006
	-ω	-0.0282	0.998051717	0.0003
Среднее значение МК по всем сериям				0.999729916
Нестабильность МК в запуске (σ)				0.0006
Нестабильность МК между запусками (σ)				0.0020

нии нуля датчика были обработаны с помощью цифрового адаптивного фильтра (рис. 4), и на основе выходных значений этого фильтра были построены аппроксимирующие зависимости. На рис. 5 представлены аппроксимирующие зависимости для циклов «нагревание — охлаждение» и «охлаждение — нагревание». Как видно,

аппроксимирующие зависимости для этих циклов отличаются (имеется гистерезис). Поэтому в качестве компенсирующих зависимостей целесообразно использовать среднюю зависимость, рассчитанную по всем циклам.

Полученные зависимости хорошо согласуются с зависимостями, приводимыми изготовите-

лем в документации на чувствительный элемент (рис. 6).

Эффективность используемой методики определения и компенсации смещения нуля от температуры подтверждена результатами испытания БИПД, которые проводились после введения компенсирующих коэффициентов. Результаты испытаний показали, что изменение температуры не приводит к изменению смещения нуля в измерительном канале БИПД (рис. 7).

Определение масштабных коэффициентов. Для каждого чувствительного элемента в соответствии с методикой, приведенной в предыдущем разделе, были определены смещение нуля (при температуре калибровки) и масштабные коэффициенты, а также их СКО в запуске и между запусками. Результаты определений для одного из измерительных каналов БИПД приведены в таблице.

Как следует из анализа приведенных данных, калибровка масштабного коэффициента чувст-

вительного элемента позволяет уменьшить его погрешность (3σ) почти в два раза по сравнению с данными, приведенными в документации производителя [High precision tri-axis inertial sensor ADIS16350/16355, Rev.A, Analog Devices, Inc.]. Нестабильность определения масштабного коэффициента между запусками составляет 0.6 %, в то время как по данным производителя — 1 %.

Надійшла до редакції 04.01.11

*A. L. Makarov, V. L. Tykhonov,
A. V. Voloshin, A. V. Khrapach*

CALIBRATION OF THE MOTION MEASUREMENT UNIT WITH MEMS SENSORS

We propose a method for the calibration of detecting element which is a part of the motion measurement unit. The calibration of each measuring channel of the motion measurement unit on the basis of the developed method and calibration parameters is carried out. The motion measurement unit is installed on one of the carrier-rockets at SDO "Yuzhnoye" for launches.