



УДК 531.383

Л. Н. Подгорная, Е. С. Солянка

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Конструктивные погрешности испытательного стенда и их влияние на калибровку микромеханического акселерометра

Рассмотрены системы координат, применяемых при описании движений осей испытательного стенда. Спроецировано ускорение на оси системы координат, связанных с акселерометром, для построения модели стенда. Описаны и введены в модель стенда конструктивные погрешности, влияющие на проекции ускорений испытуемого объекта. Модель стенда опробована при разных методах калибровки и может использоваться в эксперименте. В качестве метода испытаний выбран способ динамической калибровки из-за его удобства и быстроты проведения в реализуемой работе. Результаты измерений пропущены через фильтр Калмана для получения оценки рассматриваемых погрешностей. Учет погрешностей испытательного стенда даст возможность получать показания, наиболее приближенные к реальным значениям, тем самым повысить точность калибруемых параметров акселерометра. Это также позволит использовать менее точное оборудование в процессе калибровки, что уменьшит себестоимость данной операции.

Конструктивные погрешности, испытательный стенд, калибровка, микромеханический

Испытательные стенды служат для калибровки инерциальных датчиков. Такими являются микромеханические акселерометры. Качество калибровки зависит от конструктивных возможностей испытательного оборудования. На результате сказываются погрешности стенда, влияющие на измеряемую величину датчиков.

Проецирование ускорений испытываемого объекта. Для калибровки инерциальных датчиков применяют разные методы задания ускорения. Например, позиционирование в гравитационном поле Земли в статике. Другие методы подразумевают получение ускорений объекта в динамике, при задании гармонических колебаний по осям стенда. Один из таких методов описан в [1]. Данный метод применен в работе для моделирования работы испытательного стенда СДА-15.

Использованы следующие системы координат для описания движения стенда:

1. $O_s\xi\eta\zeta$ – горизонтная система координат, ось $O_s\xi$ направлена по вертикали.

2. $O_sx_sy_sz_s$ – система координат, связанная с основанием стенда; ось O_sz_s направлена вертикально при идеальной выставке стенда в горизонте.

3. $O_sx_1y_1z_1$ – система координат, связанная с наружной осью стенда O_sy_1 .

4. $O_sx_2y_2z_2$ – система координат, связанная с внутренней осью стенда O_sz_2 .

5. $Oxyz$ – приборная система координат исследуемого объекта, ось Oz ортогональна планшайбе, а оси Ox и Oy лежат в ее плоскости.

Для перехода к системе координат, связанной с наружной осью стенда, используют матрицу поворота $[A_{\lambda_1}]$ на угол λ_1 .

Переход к системе координат, связанной с внутренней осью стенда, осуществляют с помощью матрицы поворота $[A_{\lambda_2}]$ на угол λ_2 .

Акселерометр испытывает следующие ускорения: g – гравитационное, a_c – Кариолисово, a_r – относительное и a_e – переносное:

$$[a_c] = 2[\ddot{\Omega}_e] \times [v_r],$$

где $[\ddot{\Omega}_e]$ – угловая переносная скорость; $[v_r]$ – линейная относительная скорость.

Просуммировав эти ускорения, можно получить общее уравнение ускорений объекта:

$$[a] = [A_{\lambda_2}][a_e] + [a_r] + 2[\ddot{\Omega}_e] \times [v_r] - [A_{\lambda_2}][A_{\lambda_1}][g]. \quad (1)$$

Уравнение (1) осуществляет проецирование ускорений на систему координат, связанную с акселерометром, при отсутствии конструктивных погрешностей стенда.

Погрешности испытательного стенда. Погрешность выставки в горизонт возникает при отклонении системы координат, связанной со стендом от горизонтальной системы координат на углы ψ и θ . Углы выставки в горизонт можно видеть обозначенными на рис. 1.

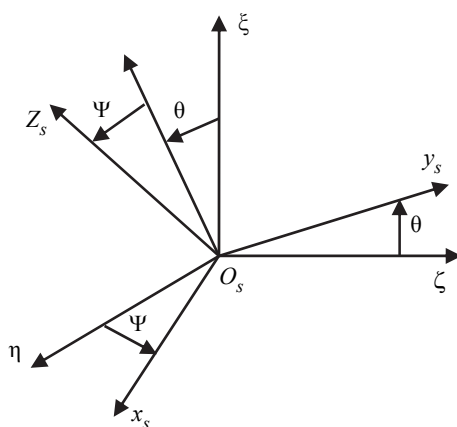


Рис. 1

Неортогональность осей стенда возможна только по оси $O_s x$, по остальным осям стенд задает вращение. Угол неортогональности обозначен φ и показан как переход к промежуточной системе координат $O_s x_\varphi y_\varphi z_\varphi$ (рис. 2). Более подробно о компенсации выставки в горизонт и неортогональности осей стенда написано в [2].

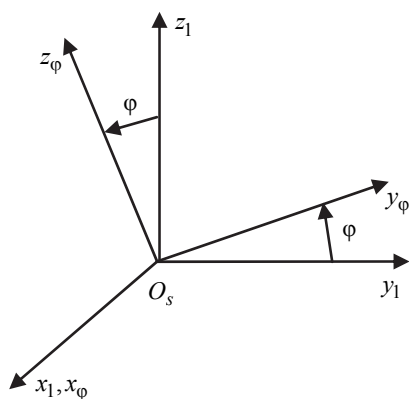


Рис. 2

Рассмотренные погрешности описываются и вводятся в уравнения проекций с помощью матриц перехода.

Непересечение осей проявляется в смещении одной системы координат относительно другой по одной из осей на расстояние δ . На проекции ускорений влияет смещение только по оси $O_s x$. По остальным осям влияние на задаваемые радиусы вращения вокруг осей стенда (R_1 – для внешней оси, R_2 – для внутренней) не будет.

Смещение δ пропорционально углу γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\delta}{R_1}, \gamma = \operatorname{arctg} \frac{\delta}{R_1}.$$

Влияние смещения по оси $O_s x$ изображено на рис. 3, где a_{en} – переносное нормальное ускорение; $a_{ет}$ – переносное тангенциальное ускорение.

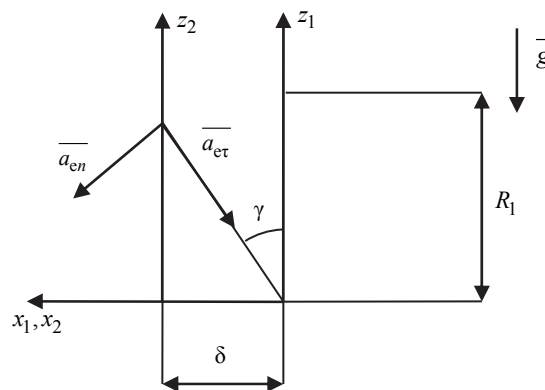


Рис. 3

При вращении по оси y радиус R_1 будет изменяться в диапазоне $\pm \delta$ за оборот. Это произойдет из-за несовпадения начала систем координат, связанных с внешней и внутренней осями стенда. Для учета данной погрешности в уравнении проекций ускорений необходимо радиус вращения вокруг внешней оси стенда умножить на $\cos \gamma$. При $\gamma = 0$ влияния погрешности не будет, а $\cos \gamma$ не будет изменять величину R_1 .

Общее уравнение ускорений, испытываемых акселерометром, с учетом введенных погрешностей будет иметь следующий вид:

$$[a] = [A_{\lambda_2}][A_\varphi](\cos \gamma[a_e]) + [a_r] + 2[\ddot{\Omega}_e] \times [v_r] - [A_{\lambda_2}][A_\varphi][A_{\lambda_1}][A_\theta][A_\psi][g]. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает ускорения объекта с учетом рассмотренных погрешностей и может применяться для моделирования работы стенда.

Существует погрешность стенда, заключающаяся в непостоянстве угловой скорости за пол-

ный оборот. Метод уменьшения влияния данной погрешности описан в [3].

Моделирование работы стенда. Модель стенда реализована в среде Matlab Simulink с учетом рассмотренных погрешностей и осуществляет расчет проекций ускорений на систему координат, связанную с объектом.

Испытания модели проводились двумя методами: при позиционировании в гравитационном поле Земли в статике (рис. 4); и при получении измерений в динамике, с заданной угловой скоростью по внешней оси стенда $\dot{\lambda}_1 = 2\pi \text{ рад/с} = 360^\circ/\text{с}$ (рис. 5). По результатам сделан вывод о работоспособности модели и возможности ее применения для получения ускорений, задаваемых стендом. На рис. 4 и 5 проекции ускорений обозначены: 1 – ось Ox , 2 – ось Oy , 3 – ось Oz .

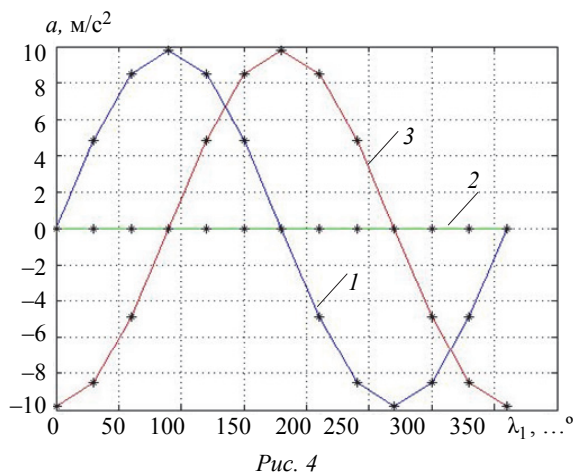


Рис. 4

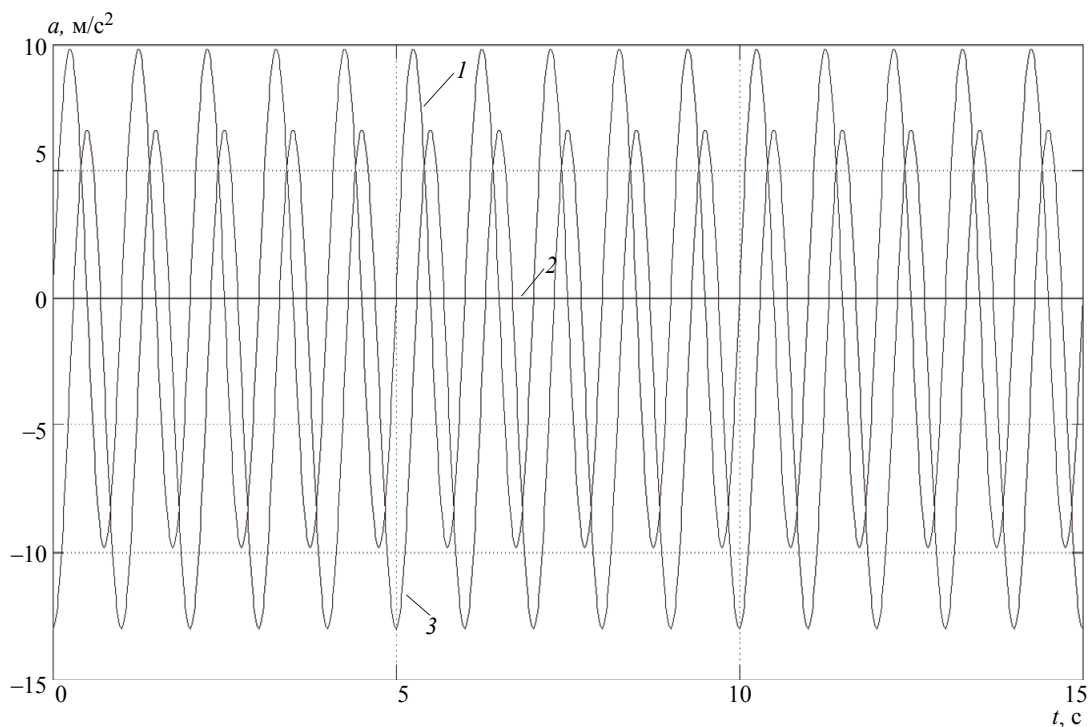


Рис. 5

При введении погрешностей в модель, максимальные отклонения от идеальных значений проекций ускорений на оси составили:

– при $\theta = 3^\circ$, $\psi = 3^\circ$ по x $\Delta a_x = 0.5134 \text{ м/с}^2$, по y $\Delta a_y = 0.5127 \text{ м/с}^2$, по z $\Delta a_z = 0.5134 \text{ м/с}^2$;

– при $\varphi = 3^\circ$ по x $\Delta a_x = 0 \text{ м/с}^2$, по y $\Delta a_y = 0.5134 \text{ м/с}^2$, по z $\Delta a_z = 0.01344 \text{ м/с}^2$;

– при $\delta = 0.3 \text{ мм}$ по x $\Delta a_x = 0 \text{ м/с}^2$, по y $\Delta a_y = 0 \text{ м/с}^2$, по z $\Delta a_z = 1.19 \text{ м/с}^2$.

Из результатов моделирования можно видеть, что все погрешности оказывают ощутимое влияние на проекции ускорений и требуют компенсации.

Получение оценок введенных погрешностей.

Получение оценок исследуемых погрешностей реализовано с помощью фильтра Калмана. Погрешности радиусов вращения ΔR_1 и ΔR_2 тоже влияют на проекции ускорений. Масштабные коэффициенты K_x , K_y , K_z и смещения нулей n_x , n_y , n_z являются калибруемыми величинами. Они задаются суммой основного значения и его погрешности.

Для получения оценок в модель стенда добавлен код, реализующий алгоритм обработки измерений. На вход блока, реализующего фильтр Калмана, подаются составляющие вектора измерений: ускорения – a_x , a_y , a_z , найденные по ним значения координат – s_x , s_y , s_z и скоростей – v_x , v_y , v_z :

$$Y = [a_x a_y a_z s_x s_y s_z v_x v_y v_z]^T.$$

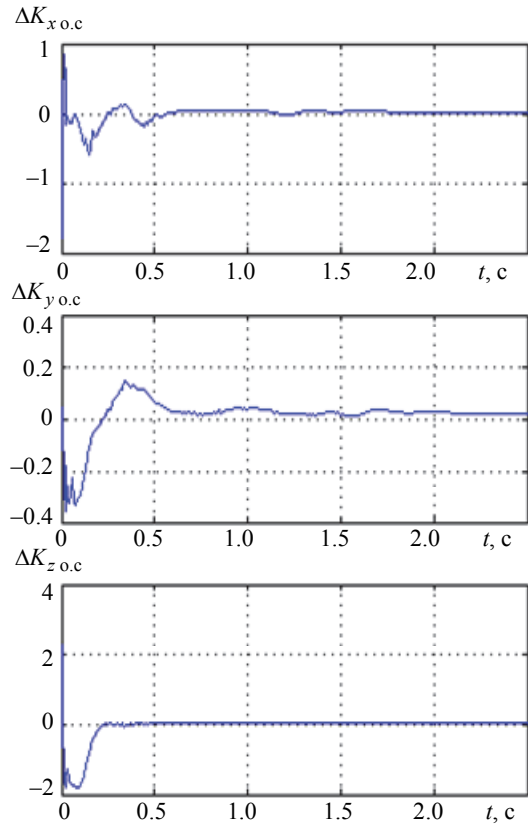


Рис. 6

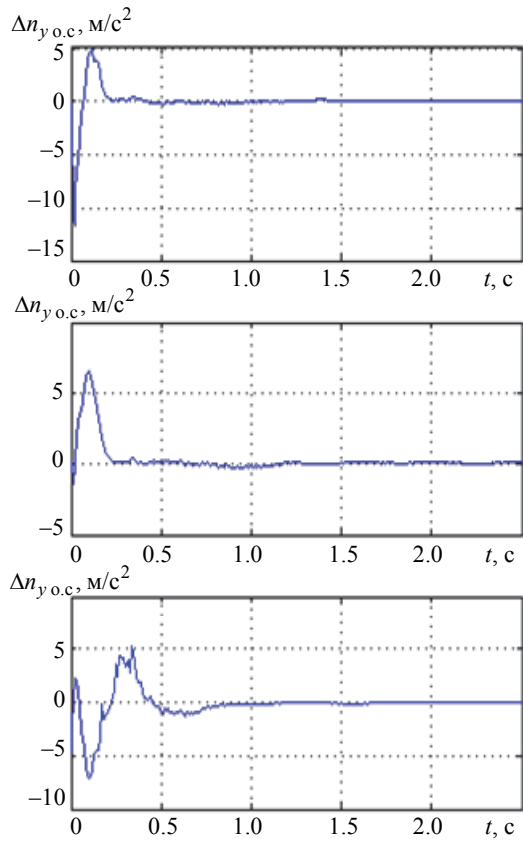


Рис. 7

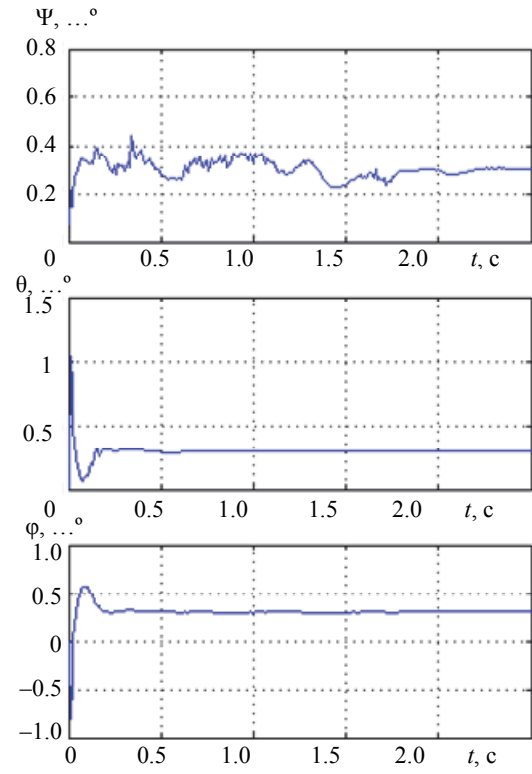


Рис. 8

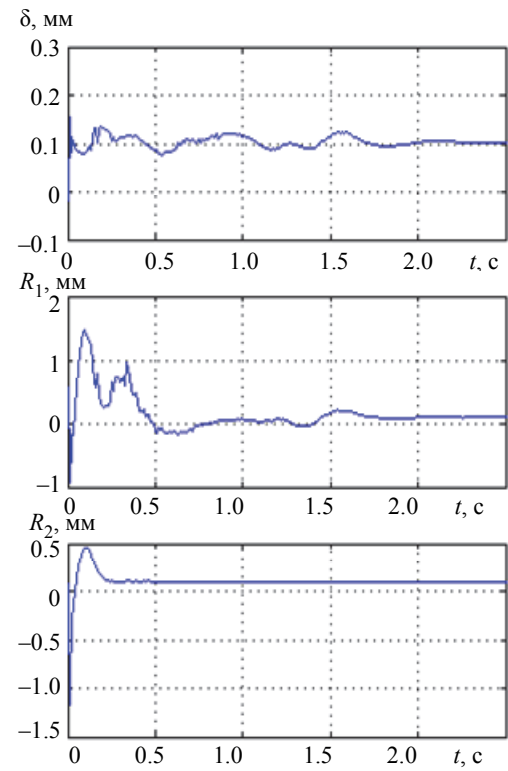


Рис. 9

Вектор состояния, содержащий в себе рассмотренные погрешности:

$$X = \left[\Delta a_x \Delta a_y \Delta a_z \Delta v_x \Delta v_y \Delta v_z \Delta s_x \Delta s_y \Delta s_z \Delta K_x \Delta K_y \Delta K_z \Delta n_x \Delta n_y \Delta n_z \psi \theta \varphi \delta \Delta R_1 \Delta R_2 \Delta \lambda_1 \Delta \lambda_2 \Delta \dot{\lambda}_1 \Delta \dot{\lambda}_2 \right],$$

где $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$ – погрешности линейных ускорений $\Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z$ – погрешности линейных скоростей объекта; $\Delta s_x, \Delta s_y, \Delta s_z$ – погрешности выработки координат объекта; $\Delta \lambda_1$ и $\Delta \lambda_2$ – погрешности углов поворота осей станда, $\Delta \dot{\lambda}_1$ и $\Delta \dot{\lambda}_2$ –

погрешности угловых скоростей осей станда. Эти погрешности являются ненаблюдаемыми.

Рассмотрены и получены оценки следующих погрешностей: масштабного коэффициента (рис. 6); смещения нуля (рис. 7); выставки в горизонте и неортогональность осей станда (рис. 8); несоосность осей станда и размещение на планшайбе (рис. 9).

Оценки численно близки к введенным в модель и приходят к установившимся значениям. Получае-

Таблица 1

Рассматриваемая погрешность	Введенная погрешность	Оцененная погрешность	Разница введенной и оцененной погрешностей, %
Масштабный коэффициент	$\Delta K_x = 0.02$ $\Delta K_y = 0.02$ $\Delta K_z = 0.02$	$\Delta K_{x \text{ о.с.}} = 0.022$ $\Delta K_{y \text{ о.с.}} = 0.021$ $\Delta K_{z \text{ о.с.}} = 0.019$	ось x: 8 ось y: 7 ось z: 6
Сдвиг нуля	$\Delta n_x = 0.05 \text{ м/с}^2$ $\Delta n_y = 0.05 \text{ м/с}^2$ $\Delta n_z = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{x \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$ $\Delta n_{y \text{ о.с.}} = 0.050 \text{ м/с}^2$ $\Delta n_{z \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	ось x: 2 ось y: 0 ось z: 2
Выставка в горизонт станда	$\psi = 3^\circ$ $\theta = 3^\circ$	$\psi_{\text{о.с.}} = 2.992^\circ$ $\theta_{\text{о.с.}} = 2.998^\circ$	для ψ : 0.3 для θ : 0.1
Неперпендикулярность осей станда	$\varphi = 3^\circ$	$\varphi_{\text{о.с.}} = 2.998^\circ$	0.1
Непересечение осей станда	$\delta = 1 \text{ мм}$	$\delta_{\text{о.с.}} = 1.01 \text{ мм}$	1
Погрешность размещения на планшайбе	$\Delta R_1 = 0.1 \text{ мм}$ $\Delta R_2 = 0.1 \text{ мм}$	$\Delta R_{1 \text{ о.с.}} = 0.11 \text{ мм}$ $\Delta R_{2 \text{ о.с.}} = 0.10 \text{ мм}$	Для R_1 : 10 Для R_2 : 0

Таблица 2

Калибруемая величина	Заданная величина	Без учета погрешностей станда	С учетом погрешностей станда	Разница, %
При заданных $\delta = 1 \text{ мм}$, $\psi = 3^\circ$, $\theta = 3^\circ$, $\varphi = 3^\circ$				
Масштабный коэффициент	$\Delta K_x = 0.02$	$\Delta K_{x \text{ о.с.}} = 0.014$	$\Delta K_{x \text{ о.с.}} = 0.022$	20
	$\Delta K_y = 0.02$	$\Delta K_{y \text{ о.с.}} = 0.021$	$\Delta K_{y \text{ о.с.}} = 0.021$	0
	$\Delta K_z = 0.02$	$\Delta K_{z \text{ о.с.}} = 0.021$	$\Delta K_{z \text{ о.с.}} = 0.019$	0
Сдвиг нуля	$\Delta n_x = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{x \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{x \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	0
	$\Delta n_y = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{y \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{y \text{ о.с.}} = 0.050 \text{ м/с}^2$	2
	$\Delta n_z = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{z \text{ о.с.}} = 0.045 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{z \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	8
При заданных $\delta = 0.1 \text{ мм}$, $\psi = 0.3^\circ$, $\theta = 0.3^\circ$, $\varphi = 0.3^\circ$				
Масштабный коэффициент	$\Delta K_x = 0.02$	$\Delta K_{x \text{ о.с.}} = 0.021$	$\Delta K_{x \text{ о.с.}} = 0.020$	5
	$\Delta K_y = 0.02$	$\Delta K_{y \text{ о.с.}} = 0.021$	$\Delta K_{y \text{ о.с.}} = 0.020$	5
	$\Delta K_z = 0.02$	$\Delta K_{z \text{ о.с.}} = 0.022$	$\Delta K_{z \text{ о.с.}} = 0.019$	5
Сдвиг нуля	$\Delta n_x = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{x \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{x \text{ о.с.}} = 0.050 \text{ м/с}^2$	2
	$\Delta n_y = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{y \text{ о.с.}} = 0.050 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{y \text{ о.с.}} = 0.050 \text{ м/с}^2$	0
	$\Delta n_z = 0.05 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{z \text{ о.с.}} = 0.048 \text{ м/с}^2$	$\Delta n_{z \text{ о.с.}} = 0.049 \text{ м/с}^2$	2

мые значения дают возможность компенсации введенных погрешностей. Введенные и полученные значения погрешностей сопоставлены в табл. 1, где посчитана их разница в процентах.

Учитывая полученные оценки, можно существенно снизить оказываемое влияние погрешностей на проекции измеряемых ускорений.

В табл. 2 показано сравнение оценок калибруемых параметров, с учетом конструктивных погрешностей стенда и без них, а также полученное преимущество в точности. Конструктивные погрешности влияют на полученный результат,

что говорит о необходимости их компенсации. Из полученных результатов видно, что это возможно.

Определено влияние конструктивных погрешностей оборудования на калибруемые величины акселерометров. Используя оценку погрешностей стенда, можно улучшить калибруемые характеристики микромеханических акселерометров.

По полученным результатам можно видеть, что оценки пришли к установившимся значениям и численно близки к введенным погрешностям. Их учет возможен при калибровке. Это дает возможность повышения точности калибруемых характеристик микромеханического акселерометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дао Ван Ба. Динамический метод исследования погрешностей триады микромеханических акселерометров: дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2015. 113 с.

2. Иванов П. А. Разработка и исследование методов испытаний микромеханических инерциальных модулей: дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2011. 137 с.

3. Анисимов С. А. Динамические методы аттестации испытательных стендов для калибровки инерциальных систем / Навигация и управление движением: материалы XIV конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн „ЦНИИ “Электроприбор”», 2012. С. 51–59.

L. N. Podgornaya, E. S. Solyanko

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

CONSTRUCTIVE ERRORS OF THE TEST BENCH AND THEIR INFLUENCE ON THE CALIBRATION OF THE MICROMECHANICAL ACCELEROMETER

The coordinate systems in which the acceleration is measured are considered. Acceleration is projected on the axis of the coordinate system associated with the accelerometer to build a model of the test bench. The design errors affecting the projections of accelerations of the tested object are described and introduced into the model of the stand. The model of the stand is tested in different calibration techniques and allows its application in the experiment. As test method the chosen method for the dynamic calibration because of the convenience of its application at work. The measurement results are passed through the Kalman filter to obtain an estimate of the errors under consideration. Taking into account the errors of the test bench will make it possible to obtain readings closest to the real values, thereby increasing the accuracy of the calibrated parameters of the accelerometer. This will also allow the use of less accurate equipment during the calibration process, which will reduce the cost of this operation.

Constructive errors, test bench, calibration, micromechanical accelerometer, deviation of parameters
