

nano range allows more than in 3 times to promote exactness of calculation of the linear moving of guide in a nano range.

Conclusion

Dynamics of the linear guides with a piezoelectric engine, which is included to micro-manipulation systems, are considered in the article. Dynamic model of such guides was obtained, which shows dependence of the linear moving on the output of guide from duration of excitation (amounts of periods of excitation) of piezoelectric engine, and also takes into account the structural features of such guides. Thus, dynamics of piezoelectric engine shows the necessity to examine the areas of acceleration and braking of piezoelectric engine in the systems working on its basis, which dynamics differs a lot.

Graphic dependences of the linear moving of guides out of duration of excitation of piezoelectric engine were obtained with help of the dynamic model.

Comparison of received theoretical and experimental data allows the possibility of more precise estimation of separating power of guide in 3-4 times with the use of dynamic model.

Литература

1. Петренко С. Ф. Пьезоэлектрический двигатель в приборостроении. – К.: «Корнійчук», 2002. – 96 с.
2. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний: Учебное пособие. – М.: Наука, 1980. – 270 с.
3. Левин А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
4. Антонюк В. С. Підвищення точності позиціонування лінійних направляючих мікроманіпуляційних систем з п'єзоелектричним двигуном / В. С. Антонюк, А. В. Белова, С. Ф. Петренко // Високі технології в машинобудуванні. - 2008. – Вип.2 (17). – С. 12 – 20.

*Надійшла до редакції
3 серпня 2012 року*

© Antonjuk V. S., Pryhodko A. V., 2012

УДК 621.396

МЕТОД КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

Успенский В. Б., Некрасова М.В.

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
г. Харьков, Украина*

Рассматриваются вопросы построения алгоритма определения в лабораторных условиях систематических погрешностей акселерометрического измерительного модуля с целью их дальнейшей компенсации. Моделируется трехосный калибровочный стенд, и анализируются условия проведения калибровки. Описанный метод был апробирован при произвольно размещенных акселерометрах. Результаты моделирования подтверждают эффективность разработанного метода. Полученные в процессе калибровки параметры способствуют су-

щественному повышению точности навигации и управления движением. Перспективной исследования является создание полного инерциального модуля на основе акселерометров сравнительно невысокой стоимости.

Ключевые слова: акселерометрический измерительный модуль, калибровка.

Введение

В настоящее время для решения задач наведения, навигации и управления движущимися объектами все более широкое применение находят акселерометрические измерительные модули (АИМ), построенные на недорогих датчиках низкого и среднего класса точности, например, микромеханических акселерометрах (АК). Такие модули, используемые на динамичных объектах с небольшим временем функционирования, могут рассматриваться, как альтернатива бесплатформенным инерциальным системам, имеющим в своем составе как акселерометры, так и гироскопы.

Актуальность

Вопросы проектирования, калибровки и эффективного использования акселерометрических измерительных систем до настоящего времени разработаны не достаточно полно. В частности, в [1] показано, каким образом по измерениям избыточного (не менее 6) числа АК можно оценивать не только вектор линейного, но и вектор углового ускорения системы координат, связанной с объектом. Однако для эффективности такой оценки необходимо достаточно точно знать расположение АК внутри модуля, включая ориентацию их осей чувствительности, поскольку технология сборки инерциальных модулей на микромеханических датчиках не позволяет обеспечить желаемое направление осей чувствительности АК точнее 1° [2].

В данной работе рассматривается задача определения в лабораторных условиях систематических погрешностей акселерометрического измерительного модуля с целью их дальнейшей алгоритмической компенсации или, другими словами, задача калибровки.

Методы стендовой калибровки инерциальных модулей вообще и блока акселерометров, в частности, рассматриваются в [2, 3]. В большинстве случаев решается задача определения «смещения нуля» и «масштабных коэффициентов» АК. В меньшей степени рассмотрены вопросы определения параметров несоосности измерительных и базовых осей модуля [2]. И, наконец, вообще не рассматривалась задача определения местоположения АК в модуле, актуальность которой следует из специфики применения АИМ [1].

Постановка задачи

Свяжем с АИМ правую ортогональную систему координат, называемую базовой системой координат (БСК), и зададим расположение акселерометра в ней неизменным радиус-вектором \vec{p} , а направление оси чувствительности АК - единичным вектором $\vec{e} = (\sin \lambda \cdot \cos \mu; \cos \lambda; \sin \lambda \cdot \sin \mu)$ (рис. 1).

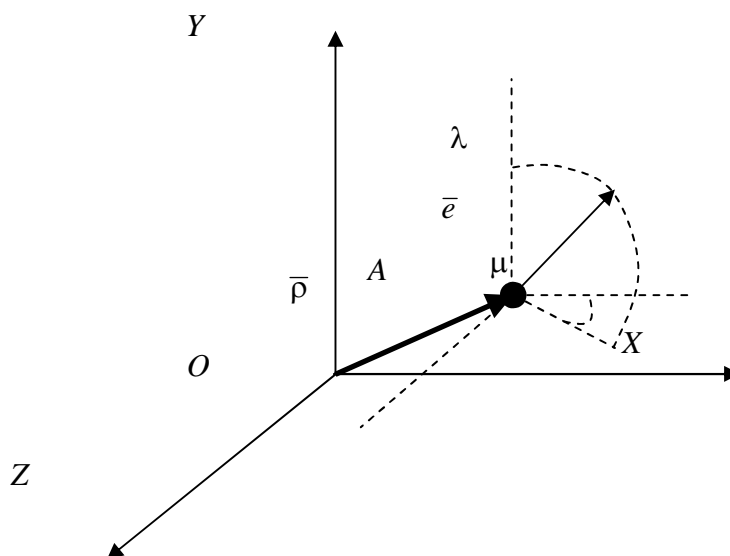


Рис. 1. Положення акселерометра в БСК

Представляя движение АИМ в инерциальном пространстве как сочетание движения точки O (начало БСК) и вращения вокруг этой точки, для абсолютного ускорения точки дислокации АК (точки A) имеем [4]:

$$\bar{w}_A = \bar{w}_o + \left[\frac{d\bar{\omega}}{dt} \times \bar{\rho} \right] + \bar{\omega} \cdot (\bar{\omega}, \bar{\rho}) - \bar{\rho} \cdot \omega^2,$$

где \bar{w}_o – абсолютное ускорение точки O , $\bar{\omega}$ – абсолютная угловая скорость, $\frac{d\bar{\omega}}{dt}$ – локальная производная угловой скорости относительно вращающейся связанной систем координат. Все векторные величины записаны в проекциях на оси БСК.

Таким образом, идеальное измерение акселерометра, расположенного в точке A , можно представить в виде скалярного произведения

$$A = (\bar{w}_A, \bar{e}).$$

Будем считать, что для каждого из n акселерометров, входящих в АИМ, известны так называемые «номинальные» значения вектора $\bar{\rho}_i$ и оси чувствительности, задаваемой ортом \bar{e}_i . В этом случае параметр A_i , вычисляемый согласно формуле

$$A_i = (\bar{w}_o, \bar{e}_i) + \left(\left[\frac{d\bar{\omega}}{dt} \times \bar{\rho}_i \right], \bar{e}_i \right) + (\bar{\omega}, \bar{e}_i) \cdot (\bar{\omega}, \bar{\rho}_i) - (\bar{\rho}_i, \bar{e}_i) \cdot \omega^2, i = \overline{1, n} \quad (1)$$

будем называть «номинальным измерением» i -го акселерометра.

Поскольку задача калибровки решается для каждого АК в отдельности, индекс i , соответствующий номеру АК, в дальнейшем будем опускать.

Примем во внимание, что фактическое расположение АК в БСК отличается от номинального на неизвестную величину $\delta\bar{\rho}$ и определяется радиус-

вектором $\bar{\rho}^* = \bar{\rho} + \delta\bar{\rho}$, а фактичному напрямленню осі чутливості со-
ответствует вектор

$$\bar{e}^* = (\sin(\lambda + \delta\lambda) \cdot \cos(\mu + \delta\mu); \cos(\lambda + \delta\lambda); \sin(\lambda + \delta\lambda) \cdot \sin(\mu + \delta\mu)),$$

также отличный от номинального.

В этом случае фактическому измерению АК в момент времени t_k соответ-
ствует выражение

$$A_k^* = (\bar{w}_{ok}, \bar{e}^*) + \left([\dot{\bar{\omega}}_k \times \bar{\rho}^*] \bar{e}^* \right) + (\bar{\omega}_k, \bar{e}^*) \cdot (\bar{\omega}_k, \bar{\rho}^*) - (\bar{\rho}^*, \bar{e}^*) \cdot \omega_k^2 + \Delta a + \xi_k, \quad (2)$$

в котором \bar{w}_{ok} – истинное линейное ускорение точки О в момент времени t_k ,
 $\bar{\omega}_k, \dot{\bar{\omega}}_k$ – истинное значение вектора угловой скорости и углового ускорения в
момент времени t_k , Δa – неизвестная постоянная систематическая погрешность
измерения АК (смещение нуля), ξ_k – случайная погрешность с нулевым сред-
ним.

Таким образом, задача калибровки АК состоит в следующем: по измерени-
ям A_k^* , полученным в различные моменты времени t_k , $k = 1, 2, 3, \dots$, определить
смещение нуля Δa и погрешности установки АК в модуле $\delta\bar{\rho}, \delta\lambda, \delta\mu$. Истинные
значения линейного ускорения, вектора угловой скорости и вектора углового
ускорения в каждый дискретный момент времени считаются известными.

Решение задачи

Обозначим правую часть выражения (2), как функцию $f(t_k, \delta\bar{\rho}, \delta\lambda, \delta\mu, \Delta a)$.
Тогда рассматриваемую задачу можно интерпретировать, как пополняемую с
течением времени систему нелинейных уравнений с известной правой частью –
фактическими измерениями акселерометра

$$f(t_k, \delta\bar{\rho}, \delta\lambda, \delta\mu, \Delta a) = A_k^*, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Для упрощения системы (3) воспользуемся предположением малости по аб-
солютной величине искомым параметров $\delta\bar{\rho}, \delta\lambda, \delta\mu, \Delta a$. Раскладывая в этих ус-
ловиях функцию f в ряд по степеням $\delta\bar{\rho}, \delta\lambda, \delta\mu, \Delta a$ и отбрасывая нелинейные
члены ряда, система (3) приводится к системе линейных уравнений относи-
тельно искомым параметров:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \bar{\rho}} \Big|_{t_k}, \delta\bar{\rho} \right) + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Big|_{t_k} \cdot \delta\lambda + \frac{\partial f}{\partial \mu} \Big|_{t_k} \cdot \delta\mu + \Delta a = A_k^* - A_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

где A_k^* – фактическое измерение АК, A_k – «номинальное измерение» АК, вы-
численное по формуле (1) с подстановкой в нее истинных значений \bar{w}_{ok} ,
 $\bar{\omega}_k, \dot{\bar{\omega}}_k$.

Учитывая наличие случайной погрешности линейную систему (4), целесо-
образно решать для достаточно большого числа измерений, полученных при

различных значениях угловой скорости и ускорения. Для решения такой системы использован метод дополненной матрицы [5], представляющий собой модификацию рекуррентного метода наименьших квадратов (МНК). В соответствии с этим методом для момента времени t_k , $k > 6$ формируется вектор-

столбец $\varphi_k = \text{col} \left(\frac{\partial f}{\partial \rho_x}, \frac{\partial f}{\partial \rho_y}, \frac{\partial f}{\partial \rho_z}, \frac{\partial f}{\partial \lambda}, \frac{\partial f}{\partial \mu}, 1 \right) \Big|_{t_k}$, вычисляется обратная матрица

размерности 6×6 $\Phi_k^* = \Phi_{k-1}^* - \frac{1}{\sigma} \Phi_{k-1}^* \cdot \varphi_k \cdot \varphi_k^T \cdot \Phi_{k-1}^*$, где $\sigma = 1 + \varphi_k^T \cdot \Phi_{k-1}^* \cdot \varphi_k$, и

вектор-столбец $\Delta_k = \Delta_{k-1} + \varphi_k \cdot (A_k^* - A_k)$. После чего получаем оценку искомых параметров $\text{col}(\delta \bar{\rho}_k^T, \delta \lambda_k, \delta \mu_k, \Delta a_k) = \Phi_k^* \cdot \Delta_k$ по совокупности k измерений. Вопрос получения матрицы Φ_6^* и вектора Δ_6 (инициализация рекуррентной процедуры) обсуждается в [5]. Применение данного метода позволяет судить о поведении получаемых оценок по мере роста числа используемых измерений, что является важным для подтверждения их достоверности.

Условия проведения калибровки

Необходимым условием эффективности процедуры оценки искомых параметров, описанной выше, является достаточная информативность тестового движения, которое совершает АИМ в процессе калибровки. От этого, в частности, зависит степень обусловленности обращаемой матрицы системы и вычислительная устойчивость решения.

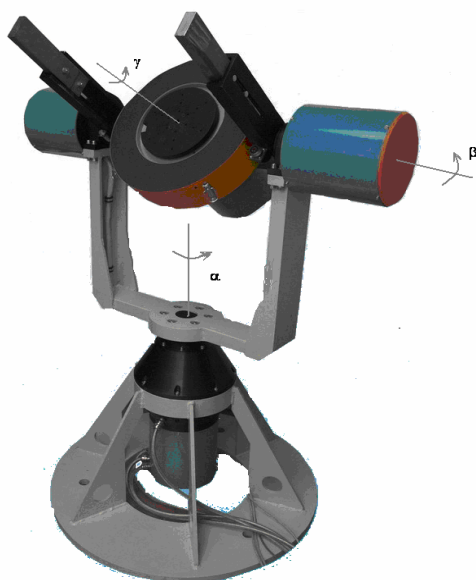


Рис. 2. Трехосный поворотный стенд

Для калибровки АИМ предлагается использовать трехосный поворотный стенд, например такой, как на рис. 2.

Такой стенд способен совершать вращательные движения вокруг трех осей с задаваемой угловой скоростью и, соответственно, угловым ускорением. Значения параметров движения стенда считаются точными и принимаются в качестве эталонных.

Для построения модели движения такого стенда и генерации эталонных значений угловой скорости и углового ускорения использовалась кватернионная кинематическая модель ортогонального типа [6]. В соответствии с ней результирующий кватернион ориентации БСК для АИМ, закрепленного на внутренней вращающейся планшайбе стенда, можно задать в виде

$$\Lambda = \Lambda_{\alpha}(t) \circ \Lambda_{\beta}(t) \circ \Lambda_{\gamma}(t),$$

где

$$\Lambda_{\alpha}(t) = \cos \frac{\alpha(t)}{2} + \sin \frac{\alpha(t)}{2} \cdot (0,1,0),$$

$$\Lambda_{\beta}(t) = \cos \frac{\beta(t)}{2} + \sin \frac{\beta(t)}{2} \cdot (1,0,0),$$

$$\Lambda_{\gamma}(t) = \cos \frac{\gamma(t)}{2} + \sin \frac{\gamma(t)}{2} \cdot (0,0,1);$$

$\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$ – реализуемые функции изменения углов поворота вокруг осей станда, изображенных на рис. 2.

Эталонная угловая скорость и эталонное угловое ускорение при этом для каждого момента времени вычисляются по формулам

$$\bar{\omega}(t) = 2 \cdot \tilde{\Lambda} \circ \dot{\Lambda},$$

$$\dot{\bar{\omega}}(t) = 2 \cdot \dot{\tilde{\Lambda}} \circ \dot{\Lambda} + 2 \cdot \tilde{\Lambda} \circ \ddot{\Lambda},$$

где

$$\dot{\Lambda} = \frac{\dot{\alpha}}{2} \cdot \Lambda'_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} + \frac{\dot{\beta}}{2} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda'_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} + \frac{\dot{\gamma}}{2} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda'_{\gamma},$$

$$\ddot{\Lambda} = \frac{\ddot{\alpha}}{2} \cdot \Lambda'_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} + \frac{\dot{\alpha}^2}{4} \cdot \Lambda''_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} + \frac{\dot{\alpha} \cdot \dot{\beta}}{2} \cdot \Lambda'_{\alpha} \circ \Lambda'_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} +$$

$$+ \frac{\dot{\alpha} \cdot \dot{\gamma}}{2} \cdot \Lambda'_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda'_{\gamma} + \frac{\ddot{\beta}}{2} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda'_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} + \frac{\dot{\beta}^2}{4} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda''_{\beta} \circ \Lambda_{\gamma} +$$

$$+ \frac{\dot{\beta} \cdot \dot{\gamma}}{2} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda'_{\beta} \circ \Lambda'_{\gamma} + \frac{\ddot{\gamma}}{2} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda'_{\gamma} + \frac{\dot{\gamma}^2}{4} \cdot \Lambda_{\alpha} \circ \Lambda_{\beta} \circ \Lambda''_{\gamma}$$

здесь $\tilde{\Lambda}$ – сопряженный кватернион, $\Lambda'_{\chi} = \frac{\partial \Lambda_{\chi}}{\partial \chi}$, $\Lambda''_{\chi} = \frac{\partial^2 \Lambda_{\chi}}{\partial \chi^2}$, $\chi \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$.

Следует отметить, что в этих условиях оси БСК совпадают с осями вращения станда, а начало БСК – с пересечением этих осей. Поскольку БСК – это виртуальная система координат, ее начало может находиться вне АИМ. В целях удобства дальнейшей эксплуатации АИМ после проведения калибровки начало БСК можно перенести в любую точку АИМ, пересчитав при этом векторы \bar{p}_i с учетом вектора переноса БСК.

Анализ информативности тестового движения по критерию степени обусловленности матрицы МНК показал, что постоянная угловая скорость по всем трем осям станда не обеспечивает получения достоверной оценки искомых параметров. В этих условиях предлагается задавать относительно внешней оси станда периодическое движение с амплитудой α_0 и круговой частотой ν вида $\alpha(t) = \alpha_0 \sin(\nu \cdot t)$. По двум другим осям достаточно создавать вращение с постоянной угловой скоростью, при этом $\beta(t) = \dot{\beta}_0 \cdot t$, $\gamma(t) = \dot{\gamma}_0 \cdot t$.

Результаты моделирования процесса калибровки

Приведем некоторые результаты моделирования разработанного метода калибровки акселерометра, номинальные значения параметров размещения для которого соответственно равны $\vec{\rho} = (0.1, 0, 0)$ (м) и $\vec{e} = (1, 0, 0)$. Фактические значения одноименных параметров отличаются от номинальных на величину «технологической погрешности» и соответствуют значениям $\vec{\rho}^* = (0.103, 0.002, 0)$ (м) и $\vec{e} = (\cos \delta\lambda \cdot \cos \delta\mu; -\sin \delta\lambda; \cos \delta\lambda \cdot \sin \delta\mu)$ при $\delta\lambda = 0.0005$ рад. (≈ 1.7 угл. мин), $\delta\mu = 0.0002$ рад. (≈ 1 угл. мин).

Задавались следующие параметры моделируемого тестового движения: $\alpha_0 = 0.17$ рад, $\nu = \frac{2 \cdot \pi}{100}$ (соответствует периоду колебаний 100 с), $\beta_0 = 0.14$ рад/с, $\gamma_0 = 0.4$ рад/с. В этом случае угловая скорость и угловое ускорение в проекциях на оси БСК имеет вид, как на рис. 3, 4.

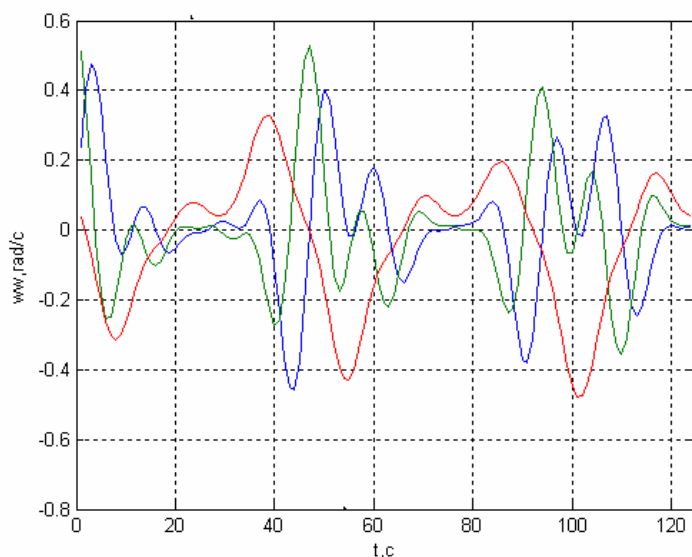


Рис. 3. Еталонне значення кутової швидкості в проекціях на осі БСК

Измерения АК включали случайную погрешность с нулевым средним и равномерным распределением из диапазона $[-10^{-5}; 10^{-5}]$ м/с² и генерировались и обрабатывались с частотой 100 Гц. Фрагмент измерений, формируемых АК, приведен на рис. 5.

В результате реализации метода калибровки получены зависимости оценок искомых параметров от времени накопления данных (рис. 6).

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что погрешность калибровки АК в рассматриваемых условиях не превышает 10^{-5} м по каждой компоненте радиус-вектора положения АК, параметры несоосности измерительных осей и осей БСК определены с ошибкой до 2 угл. с, погрешность определения смещения нуля – не более 10^{-6} м/с².

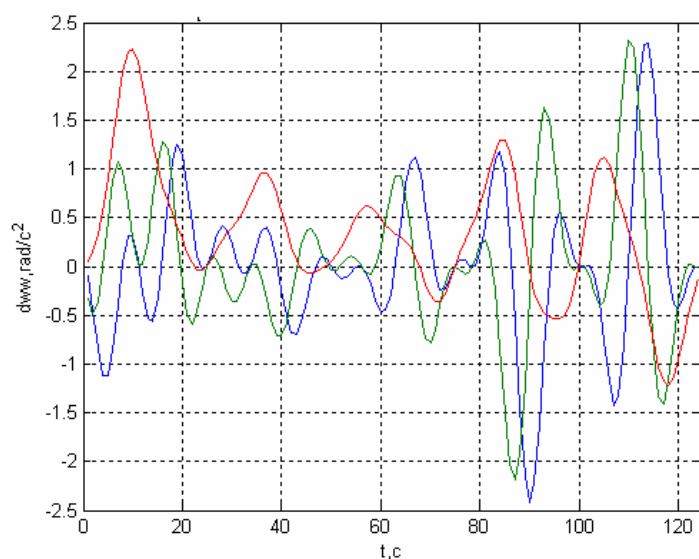


Рис. 4. Эталонное значение углового ускорения в проекциях на оси БСК

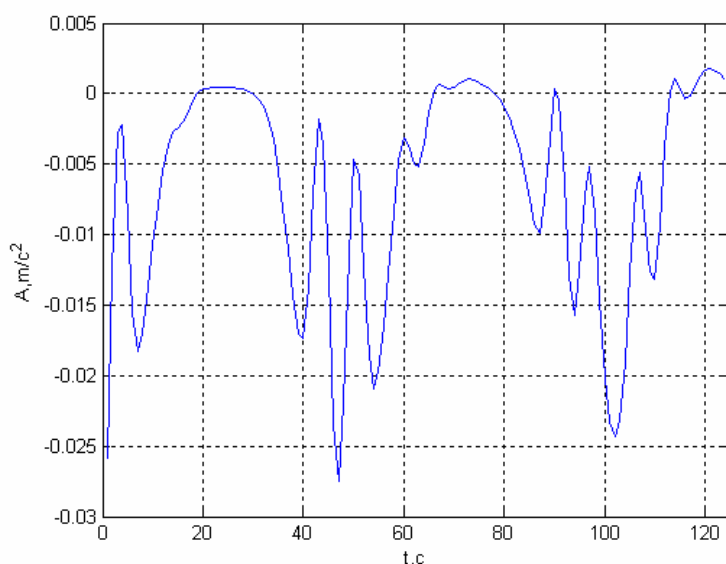


Рис. 5. Измерения акселерометра, отвечающие тестовому движению

Описанный метод калибровки апробирован для произвольно расположенных акселерометров и дал схожие результаты. Следует заметить, что для АК с номинальным направлением оси чувствительности, близким к оси Y , углы, аналогичные углам λ и μ , следует задавать относительно других осей, чтобы не допустить их вырождения (при $\lambda = 0$, угол μ может быть любым).

Поскольку процедура калибровки занимает незначительное время и может осуществляться для всего набора АК одновременно, ее можно применять и для определения температурных зависимостей рассматриваемых параметров, если это необходимо.

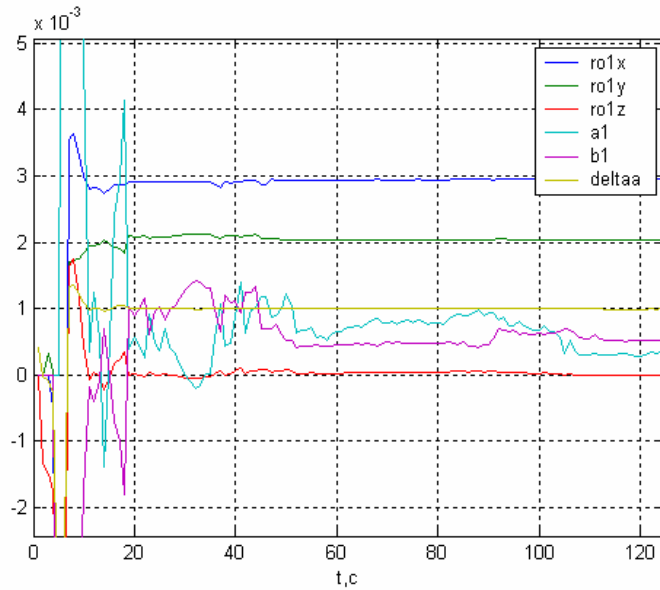


Рис. 6. Оценки параметров погрешности АК

Заклучение

В данной работе показана принципиальная возможность определения параметров блока акселерометров на трехосном поворотном стенде при произвольном расположении акселерометров.

Результаты моделирования подтверждают эффективность разработанного метода калибровки акселерометрического измерительного модуля. Получаемые в процессе калибровки параметры, используемые в дальнейшем для алгоритмической компенсации ошибок измерений, способствуют существенному повышению точности измерений АИМ и, в конечном итоге, повышению точности навигации и управления движением.

Литература

1. Успенский В. Б. Измерение ускорения и угловой скорости твердого тела с помощью избыточной системы акселерометров / В. Б. Успенский, М. В. Некрасова // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – Вып. 63. – С. 138 – 145.
2. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. – Кировоград: Полимед-Сервис, 2011. – 172 с.
3. Krohn A. Inexpensive and Automatic Calibration for Acceleration Sensors / A. Krohn, M. Beigl, Ch. Decker, U. Kochendorfer, Ph. Robinson, T. Zimmer // Universitat Karlsruhe, 2004. <http://www.teco.edu/~krohn/krohnaccl.pdf>.
4. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. – М.: Наука, 1979. – 294 с.
5. Фролов Ю. А. Метод дополненной матрицы для решения одного вида алгебраических уравнений / Ю. А. Фролов, В. Б. Успенский // Деп. в УкрНИИНТИ № 1269 Ук-83. – Харьков, 1983. – С. 6.
6. Успенский В. Б. Теоретические основы гидросилового управления ориентацией космического летательного аппарата. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – С. 327.

Надійшла до редакції
21 червня 2012 року

© В. Б. Успенский, М. В. Некрасова, 2012