

На правах рукописи



Дао Ван Ба

**ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ТРИАДЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ**

Специальность: 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Боронахин Александр Михайлович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Автоматы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Челпанов Игорь Борисович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации и управления в аэрокосмических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения

Пономарев Валерий Константинович

Ведущая организация – ОАО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится «01» июля 2015 года в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, ауд. 5108

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте www.eltech.ru.

Автореферат разослан «30» апреля 2015 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.06

д.т.н., доцент



/А.М. Боронахин/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Области применений микромеханических инерциальных датчиков непрерывно расширяются. Благодаря своим малым габаритным характеристикам, энергопотреблению и себестоимости, формируется новый сегмент рынка миниатюрных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Микромеханические акселерометры (ММА) обеспечивают широкий диапазон измерений и точностные характеристики ИНС среднего класса. Однако требования к точностям инерциальных датчиков и систем на их основе при решении задач навигации и ориентации с каждым днем ужесточаются, что приводит к необходимости совершенствования методов их испытаний с целью получения достоверных математических моделей погрешностей, учитывающих динамические характеристики и условия дальнейшей эксплуатации.

Наиболее используемыми на сегодняшний день методами испытания акселерометров являются: методы с использованием вращающихся платформ (центрифуг), поворотов в гравитационном поле Земли, линейно перемещающихся платформ [1], скоростной метод [2], скалярный метод испытаний 3-хосных блоков (триад) взаимно ортогональных акселерометров [3] и т.д. К их основным недостаткам следует отнести: 1) сложность конструкции; 2) жесткие требования к начальной выставке; 3) в ряде случаев отсутствие возможности оценивания углов взаимной неортогональности измерительных осей триады; 4) значительное время подготовки и проведения испытания.

Следует отметить, в первую очередь, тот факт, что триады ММА широко применяются на высокоманевренных объектах, характерной особенностью которых является непостоянство положения центра качения в приборной системе координат. Помимо этого, в большинстве случаев взаимное расположение ММА в триаде таково, что их оси чувствительности не пересекаются в одной точке, кроме того, в случае использования трехосного ММА, эта точка отстоит от начала приборной системы координат измерительного блока. Данные конструктивные особенности, характеризуемые радиус-векторами, должны оцениваться на стадии испытаний и учитываться в дальнейшем в алгоритмах БИНС.

Выше сказанное позволяет утверждать, что актуальным является разработка новых динамических методов исследований погрешностей триады ММА, предполагающих проведение испытания в условиях, близких к реальному режиму движения объекта [4]. При этом необходимо без потери точности характерной для традиционного метода поворотов в гравитационном поле Земли сократить время испытаний, что в свою очередь позволит снизить требования к точности начальной выставки стенда.

Целью работы является разработка динамического метода исследований погрешностей триады микромеханических акселерометров.

Поставленная цель достигается решением **следующих задач**:

1. Анализ существующих методов испытаний акселерометров;
2. Разработка динамического метода исследования погрешностей триады ММА, учитывающего взаимное расположение осей чувствительности акселерометров, позволяющего сократить время испытания и тем самым снизить требования к выставке стенда;
3. Выработка требований к испытательному стенду;
4. Проверка эффективности предложенного метода путем имитационного моделирования;
5. Экспериментальные исследования динамического метода исследования погрешностей триады ММА на двухосном стенде.

Методы исследований:

При решении поставленных задач в работе использовались основные положения теоретической и аналитической механики, векторной и матричной алгебры, методов математического и имитационного моделирования, теории статистической обработки экспериментальных данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Исследования погрешностей акселерометров в режиме колебательных угловых движений позволяют сократить время испытаний, благодаря динамическому изменению входных воздействий;
2. Динамический метод, в отличие от статических, позволяет снизить погрешность калибровки за счет учета взаимного расположения акселерометров в триаде;
3. Совместная обработка показаний испытываемой триады микромеханических акселерометров и датчиков углов позволяет оценить погрешность начальной выставки стенда и тем самым скорректировать ее влияние на результаты калибровки.

Научная новизна:

В процессе проведения исследования получены новые научные результаты:

1. Разработан динамический режим испытания акселерометров, в отличие от стандартного метода, предполагающий колебательное движение;
2. Разработан алгоритм испытания акселерометров, учитывающий геометрическое местоположение триады акселерометров от центра качания;
3. Предложена схема комплексирования показаний ММА с показаниями датчиков углов, позволяющая оценить погрешности выставки стенда в плоскости горизонта.

Практическая ценность работы:

1. Разработанный метод испытания по сравнению со статическим методом позволяет сократить время испытаний ММА на порядок;
2. Программное обеспечение, разработанное в среде Matlab, позволяет имитировать показания триады микромеханических акселерометров в режиме угловых колебаний и может быть использовано в учебном процессе для исследования погрешностей инерциальных навигационных систем;
3. Предложенный алгоритм позволяет снизить требования к выставке средства испытаний.

Реализация и внедрение результатов работы:

Результаты, полученные в работе, внедрены в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем, а также использованы при проведении научных исследований в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Апробация работы:

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. VIII международной научно-практической конференции «Современные проблемы машиностроения» СПМ – 2014, 16 –18 октября 2014 г., Томск, Россия;
2. Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт Петербург, Россия (2011, 2013 и 2015 г.).

Публикации:

Основные теоретические и практические результаты диссертации изложены в 7 публикациях, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 статья в другом издании, 4 – в научных сборниках и трудах российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 81 наименование. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста, включает 48 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны методы исследования, приведены научные и практические ценности исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен обзор состояния инерциальных датчиков и методов испытаний акселерометров.

На сегодняшний день инерциальные технологии применяются не только в традиционной области навигации и управления движением, но и в таких, как геодезия, топография, гравиметрия, метрология, логистика и др. [5]. Микромеханические инерциальные датчики являются ключевой развивающейся технологией для миниатюрных инерциальных навигационных систем.

Точность работы навигационных систем в значительной степени зависит от качества выполнения исследований адекватности математических моделей погрешностей инерциальных измерительных модулей, используемых в дальнейшем в алгоритмах бортового вычислителя.

Изучение литературы по испытанию акселерометров [1-6] показало, что существуют следующие основные методы:

1. Статические методы

При испытаниях задаются фиксированные значения линейных ускорений по оси чувствительности акселерометра, а длительность определяется требованиями точности калибровки и уровнем шума выходного сигнала датчика.

Стандартный метод поворотов в гравитационном поле Земли.

В этом методе измерительная ось акселерометра расположена под некоторым углом λ к местной вертикальной оси (см. Рис. 1 –). Здесь $O_S\xi\zeta$ – географическая система координат, $O_S\xi$ – местная вертикаль. В идеальном случае ускорение по измерительной оси $a_\lambda = g\cos\lambda$. Для реализации этого метода необходимо знать значение g и определить направление ускорения свободного падения в точке испытаний, от этого направления ведут отсчет угла λ . В настоящее время значение g определено с достаточной для испытаний акселерометров точностью [1]. В качестве средств испытаний могут быть использованы поворотные платформы с одной или двумя взаимно перпендикулярными осями.

Существует также *скалярный метод* (шестипозиционный метод), используемый для испытания триады акселерометров [3, 6] и основанный на том, что независимо от ориентации осей чувствительности датчиков относительно географической системы координат,

при отсутствии внешних воздействий, сумма квадратов показаний трех перпендикулярно расположенных датчиков равна квадрату опорного воздействия (ускорения свободного падения). Отличие состоит в том, что в качестве эталона выступает не вектор, а скаляр, функционально связанный с этим вектором.

Метод центрифуги – метод с использованием одной ротационной платформы, вращающейся вокруг оси $O_S\xi$, используется для воспроизведения постоянного ускорения. В этом случае акселерометр установлен на расстоянии R от оси вращения горизонтально расположенной ротационной платформы, а его ось чувствительности направлена к центру (см. Рис. 2). Платформа вращает со скоростью $\dot{\lambda}$, а величина воспроизводимого центрифугой ускорения может быть представлена выражением $a_{ц} = \dot{\lambda}^2 R$.

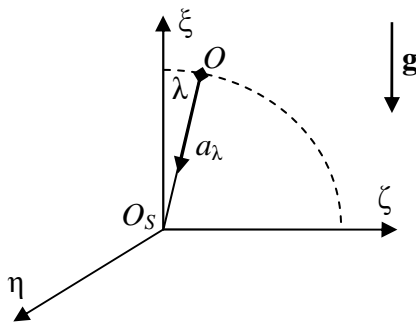


Рис. 1 – Стандартный метод

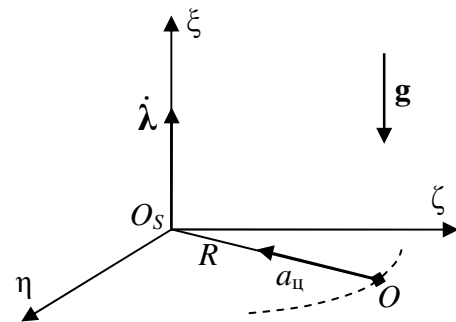


Рис. 2 – Центрифуга

Центрифуги являются единственным практическим средством для воспроизведений ускорений, превышающих ускорение свободного падения.

2. Динамические методы

В большинстве случаев на практике для решения навигационной задачи необходимо иметь акселерометры с относительно нешироким частотным диапазоном (от постоянных ускорений до десятков, реже сотен герц), но достаточно высокой точностью измерения мгновенного или усредненного за определенный интервал времени значения ускорения. Как правило, динамические погрешности при измерении ускорений являются доминирующими [1]. Поэтому более эффективным с точки зрения качества испытания является реализация режимов движения, свойственных объекту, для которого разрабатывается ИНС – действующие ускорения не являются постоянными, а меняются со временем.

В методах испытаний в гравитационном поле Земли, при необходимости воспроизведения переменного ускорения, с помощью физического маятника или центрифуги с наклонной осью вращения можно задать изменение направления оси чувствительности акселерометра. При этом частота задаваемого ускорения зависит от периода колебания маятника (или скорости вращения центрифуги), а амплитуда – от амплитуды колебания маятника (или угла наклона оси центрифуги).

Такой способ позволяет воспроизводить относительно большие амплитуды ускорения, но не больше g .

Для воспроизведения ускорения с амплитудой большей g используют центрифуги с изменяющимся расстоянием от оси вращения до центра инерции чувствительного элемента исследуемого акселерометра, либо двойными центрифугами. Таким образом, при исследовании погрешностей, акселерометр перемещается по криволинейной траектории.

Существуют также методы линейно перемещающейся платформы, когда испытуемый прибором перемещается возвратно-поступательно по определенному закону. Тогда ускорение изменяется по тому же закону, по которому перемещается платформа. Испытательные стенды реализуются с помощью электромеханических, либо электродинамических вибраторов. Однако существует ряд конструкционных ограничений: 1) невозможно задать на низких частотах большие амплитуды перемещений, что ограничивает динамический диапазон испытаний акселерометров; 2) необходимо обеспечить однонаправленность перемещения платформы – в противном случае, на результат измерения будет влиять проекция вектора ускорения свободного падения.

Основные достоинства и недостатки наиболее часто используемых методов испытания акселерометров сведены в табл. 1:

Табл. 1

	Оцениваемые критерии	Методы		
		центрифуги	стандартный	скалярный
1	Полнота оцениваемых параметров математической модели	+	+	–*
2	Возможность оценки положения акселерометра относительно осей стенда	+**	–	–
3	Простота конструкции испытательного стенда	–**	+	+
4	Независимость от точности выставки стенда	–	–	+
5	Диапазон измерений более $\pm g$	+	–	–

* – углы неортогональностей не наблюдаемы; ** – центрифуга с изменяющимся радиусом.

Таким образом, актуальной представляется разработка нового метода испытания триады акселерометров свободного от недостатков существующих методов

В главе 2 рассматривается предложенный в диссертации динамический метод исследования погрешностей акселерометров, в котором триада акселерометров устанавливается на платформу двухосного испытательного стенда (на априорно известном удалении от центра вращений), совершающего квазигармонических угловые колебания по обеим осям. Информация об угловом движении считывается с акселерометров и одновременно с угловых датчиков стенда и направляется на фильтр Калмана. Оптимальная фильтрация полученной информации позволяет оценить параметры акселерометров, а также обеспечить наблюдаемость оценок погрешностей неточности выставки стенда относительно плоскости горизонта.

При этом формирование квазигармонических угловых колебаний по обеим осям обеспечивает непрерывное изменение проекции ускорения на оси чувствительностей в диапазоне $\pm g$. В этом случае испытуемый инерциальный модуль участвует в сложном движении, где за переносное принимается движение вокруг наружной оси, а за относительное – вокруг внутренней оси. Движение триады в $O_s\xi\eta\zeta$ является абсолютным, ее ускорение определяется суммой проекции кажущегося ускорения, измеренного акселерометрами, и ускорения гравитационного поля Земли.

На рис. 3 изображен двухосный стенд с установленным на нем инерциальным измерительным модулем (ИИМ) и введены следующие системы координат:

$O_{Sx_Sy_Sz_S}$ —система координат, связанная с основанием стенда;

$O_{Sx_1y_1z_1}$ — система координат, связанная с наружной (горизонтальной) осью стенда;

$O_{Sx_2y_2z_2}$ — система координат, связанная с внутренней осью стенда (с планшайбой);

O_{xyz} – приборная система координат, связанная с испытуемой триадой акселерометров;

λ_1, λ_2 – углы разворотов вокруг наружной и внутренней осей стенда;

$\Delta\psi, \Delta\theta$ – погрешности выставки стенда ($O_{Sx_Sy_Sz_S}$) в плоскости горизонта ($O_{S\eta\zeta}$);

$\mathbf{R} = (x_2, y_2, z_2)$ – радиус-вектор, определяющий место расположения триады акселерометров в системе координат $O_{Sx_2y_2z_2}$;

$\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ ($\ddot{\lambda}_1, \ddot{\lambda}_2$) – угловые скорости (ускорения) вращений вокруг наружной и внутренней осей стенда.

В работе была использована математическая модель показаний триады акселерометров следующего вида [7]:

$$\begin{bmatrix} W_x^{np} \\ W_y^{np} \\ W_z^{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_y & \beta_z \\ \alpha_x & 1 & -\gamma_z \\ -\beta_x & \gamma_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx}W_x & K_{xy}W_x & K_{xz}W_x \\ K_{yx}W_y & K_{yy}W_y & K_{yz}W_y \\ K_{zx}W_z & K_{zy}W_z & K_{zz}W_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} W_{x0} \\ W_{y0} \\ W_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_x^{ш} \\ W_y^{ш} \\ W_z^{ш} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: K_i , ($i=x,y,z$) – масштабные коэффициенты (мВ/г);

K_{ii} – коэффициенты нелинейности выходных характеристик (1/г);

K_{ij} , ($i \neq j$) – коэффициенты перекрестных связей (1/г);

W_{i0} – сдвиги нулей (мВ);

W_i^{np} – показания датчика (мВ);

$W_i^{ш}$ – шумовая составляющая показаний (мВ);

$\alpha_y, \beta_z, \alpha_x, \gamma_z, \beta_x, \gamma_y$ – углы неортогональностей, характеризующие положение измерительных осей акселерометров относительно осей триады O_{xyz} [рад].

Таким образом, за счет введения квазигармонических колебаний и при ненулевом, априорно известном, радиус-векторе \mathbf{R} , вектор входных воздействий $[W_x, W_y, W_z]^T$ (1) по осям приборной системы координат имеет вид:

$$\mathbf{W}_{xyz} = C_{\lambda_2}^{-1} C_{\lambda_1}^{-1} \left[\dot{\lambda}_1 \times (\dot{\lambda}_1 \times \mathbf{R}) + \ddot{\lambda}_1 \times \mathbf{R} + \dot{\lambda}_2 \times (\dot{\lambda}_2 \times \mathbf{R}) + \ddot{\lambda}_2 \times \mathbf{R} + 2\dot{\lambda}_1 \times \mathbf{V}_r - \mathbf{g} \right], \quad (2)$$

где: $C_{\lambda_1}, C_{\lambda_2}$ – матрицы переходов из $O_{Sx_1y_1z_1}$ в $O_{Sx_Sy_Sz_S}$ и из $O_{Sx_2y_2z_2}$ в $O_{Sx_1y_1z_1}$, соответственно; \mathbf{V}_r – относительная скорость триады акселерометров.

В этом случае, для обеспечения полной наблюдаемости оцениваемых параметров математической модели (1) и решения задачи по оценке взаимного расположения акселерометров в триаде с обеспечением инвариантности к неточности выставки испытательного стенда, достаточно реализовать угловые перемещения по следующему критерию: $\lambda_{10}=360^\circ$; $\lambda_{20}=90^\circ$ – амплитуды угловых колебаний относительно наружной и внутренней осей стенда с периодами, соответствующими соотношению $2T_1=5T_2$, что обеспечивает прохождение триады через угловые положения, используемые в стандартном методе. При этом в слу-

чае, если в состав ИИМ также входит триада датчиков угловой скорости, то при задании значений периодов должны учитываться максимальные значения измеряемых угловых скоростей.

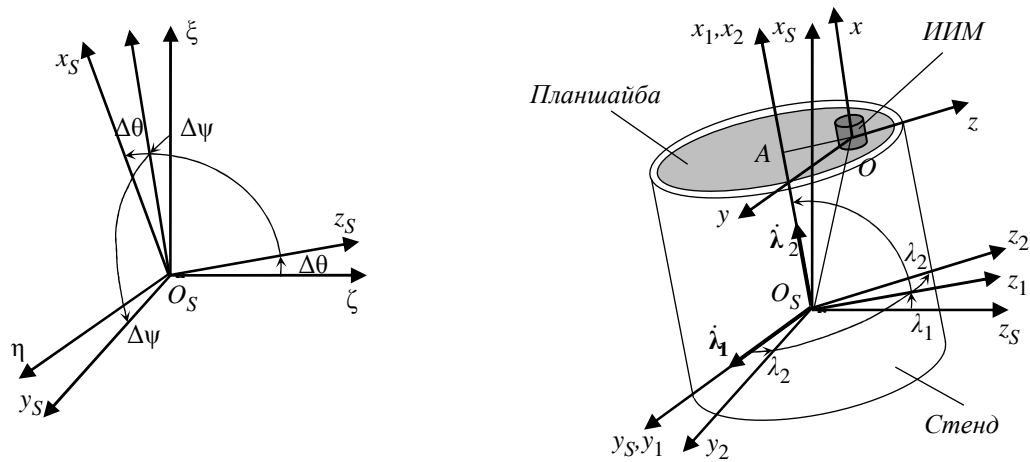


Рис. 3 – Системы координат

На рис. 4 приведена предлагаемая схема совместной обработки показаний триады ММА и ДУ испытательного стенда.

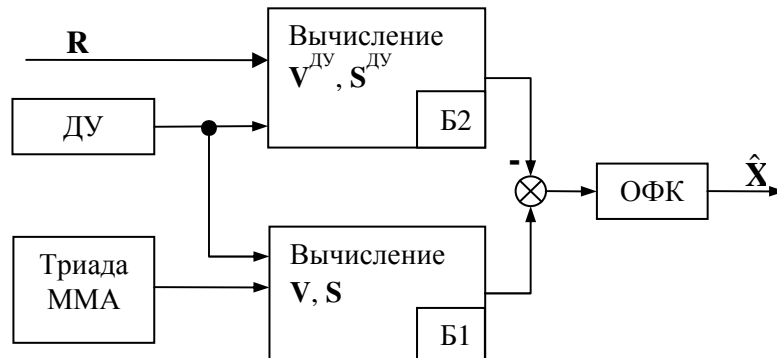


Рис. 4 – Схема совместной обработки показаний триады ММА и ДУ

Обозначения на рис. 4: ОФК – оптимальный фильтр Калмана; $\hat{\mathbf{X}}$ – оценка вектора состояния.

В блоке Б1 вычисляются параметры движения точки O по показаниям ММА и ДУ. При этом показания ДУ используются в том числе для перепроектирования кажущегося ускорения, измеренного акселерометрами, на оси $O_S \xi \eta \zeta$:

$$\mathbf{a} = C_{\Delta\psi} C_{\Delta\theta} C_{\lambda_1 + \Delta\lambda_1} C_{\lambda_2 + \Delta\lambda_2} A_\alpha (\mathbf{W} + \Delta\mathbf{W}) + \mathbf{g};$$

$$\mathbf{V} = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \mathbf{a} dt + \mathbf{V}(t_{j-1}); \mathbf{S} = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \mathbf{V} dt + \mathbf{S}(t_{j-1}), \quad (3)$$

где: $\Delta\mathbf{W}$ – погрешности акселерометров триады в измерении задаваемых испытательным стендом ускорений \mathbf{W} ; A_α – матрица перехода от системы координат $Oxyz$ к $O_S \xi \eta \zeta$, определяемая углами неортогональностей $\alpha_y, \beta_z, \alpha_x, \gamma_z, \beta_x, \gamma_y$; $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ – погрешности ДУ по наружной и внутренней осям испытательного стенда.

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\psi & 0 \\ \Delta\psi & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \lambda_1 - \sin \lambda_1 (\Delta\lambda_1 + \Delta\theta) & 0 & \sin \lambda_1 + \cos \lambda_1 (\Delta\lambda_1 + \Delta\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \lambda_1 - \cos \lambda_1 (\Delta\lambda_1 + \Delta\theta) & 0 & \cos \lambda_1 - \sin \lambda_1 (\Delta\lambda_1 + \Delta\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha_x & -\beta_x \\ -\alpha_y \cos \lambda_2 - \beta_z \sin \lambda_2 & \cos \lambda_2 - \sin \lambda_2 (\Delta\lambda_2 - \gamma_z) & -\sin \lambda_2 - \cos \lambda_2 (\Delta\lambda_2 - \gamma_y) \\ -\alpha_y \sin \lambda_2 + \beta_z \cos \lambda_2 & \sin \lambda_2 + \cos \lambda_2 (\Delta\lambda_2 - \gamma_z) & \cos \lambda_2 - \sin \lambda_2 (\Delta\lambda_2 - \gamma_y) \end{bmatrix} \cdot (\mathbf{W} + \Delta\mathbf{W}) - \mathbf{g}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что:

- 1) $\Delta\theta$ и $\Delta\lambda_1$ можно объединять в одну суммарную погрешность $\Delta\theta^c = \Delta\theta + \Delta\lambda_1$, т.е. последовательность поворотов от $O_S \xi \eta \zeta$ к $O_S x_2 y_2 z_2$ (рис. 5) имеет вид:

$$\Delta\psi \rightarrow \underbrace{\Delta\theta \rightarrow \Delta\lambda_1}_{\Delta\theta^c} \rightarrow \lambda_1 \rightarrow \Delta\lambda_2 \rightarrow \lambda_2$$

- 2) для того, чтобы оценивались отдельные параметры $\Delta\lambda_2$, γ_y , γ_z требуется выполнение дополнительной процедуры.

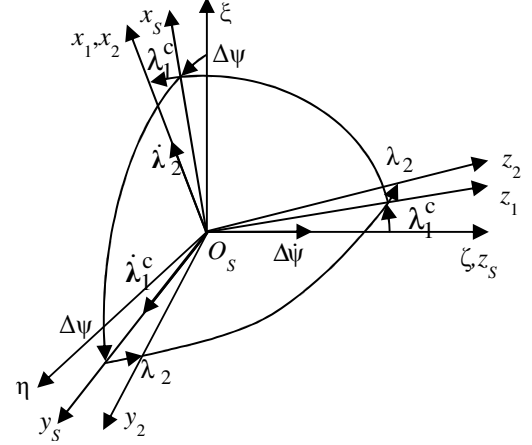


Рис. 5. Переход от горизонтальной системы координат к приборной

Линеаризовав полученные выражения (3), (4) методом варьирования, получаем линейное уравнение ошибок – связи погрешностей выработки параметров движения с погрешностями триады акселерометров и неточностью вводов начальных условий:

$$\Delta \dot{\mathbf{V}} = \Delta \mathbf{a}, \quad \Delta \dot{\mathbf{S}} = \Delta \mathbf{V},$$

которое может быть представлено в векторно-матричной форме: $\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{G}\mathbf{w}$, где \mathbf{w} – вектор возмущения; \mathbf{F} – матрица состояния; \mathbf{G} – матрица возмущения.

Основные составляющие погрешности ДУ испытательного стенда могут быть представлены в виде:

$$\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_{i0} + \Delta\lambda_{\dot{\lambda}_i} + \Delta\lambda_i^{\text{III}},$$

где: $\Delta\lambda_{i0}$ – систематическая погрешность; $\Delta\lambda_i^{\text{III}}$ – случайная составляющая погрешности; $\Delta\lambda_{\dot{\lambda}_i}$ – динамическая погрешность, вносимая влиянием скорости вращения.

Решение задачи по оценке взаимного расположения акселерометров в триаде с обеспечением инвариантности к неточности выставки испытательного стенда возлагается на ОФК, поэтому в вектор состояния, дополнительно к параметрам модели (1), вводятся: погрешности выставки стенда и погрешности ДУ ($\Delta\psi$, $\Delta\theta^c$, $\Delta\lambda_2$); погрешность знания радиус-вектора $\Delta\mathbf{R} = (\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2)^T$, определяющие положение триады акселерометров относительно начала приборной системы координат $Oxyz$:

$$\mathbf{X} = [\Delta V_i, \Delta S_i, \Delta\psi, \Delta\theta^c, \Delta\lambda_2, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2, \delta W_{i0}, \delta K_i, \alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_z, \gamma_y, \gamma_z, K_{ij}]^T. \quad (5)$$

В блоке Б2 (рис. 4) вычисляются параметры движения точки O по показаниям ДУ и радиус-вектора \mathbf{R} :

$$\mathbf{S}^{\text{ДУ}} = C_{\Delta\psi} \cdot C_{\lambda_1} \cdot C_{\lambda_2} \cdot \mathbf{R}; \quad \mathbf{V}^{\text{ДУ}} = C_{\Delta\psi} \cdot \left[(\dot{\lambda}_1 + C_{\lambda_1} \cdot \dot{\lambda}_2) \times (C_{\lambda_1} \cdot C_{\lambda_2} \cdot \mathbf{R}) \right].$$

Угловые скорости вращения стенда $\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2$ вырабатываются по показаниям ДУ:

$$\dot{\lambda}_i(j) = \frac{\lambda_i(j) - \lambda_i(j-1)}{dt} = \dot{\lambda}_i^r(j) + \Delta\dot{\lambda}_i(j),$$

где: dt – дискрет времени решения задачи; j – номер измерения; i – номер оси испытательного стенда; $\dot{\lambda}_i^r(j)$ – действительная угловая скорость вращения вокруг i -оси в момент j ; $\Delta\dot{\lambda}_i(j)$ – погрешность выработки угловой скорости вращения.

При формировании вектора измерений ОФК используются:

- скоростное измерение: $\mathbf{z}_V = \mathbf{V} - \mathbf{V}^{\text{ДУ}}$;
- позиционное измерение: $\mathbf{z}_S = \mathbf{S} - \mathbf{S}^{\text{ДУ}}$;
- дополнительное измерение, о котором было сказано выше: $\mathbf{z}_{\Delta\psi - \Delta\lambda_2} = \Delta\psi - \Delta\lambda_2 = 0$.

Тогда вектор измерений $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}_V, \mathbf{z}_S, \mathbf{z}_{\Delta\psi - \Delta\lambda_2}]^T$, а уравнение измерений традиционно представляется в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{v},$$

где \mathbf{H} – матрица измерений; \mathbf{v} – вектор шумов измерений.

Анализ источников *методических погрешностей* выполнялся с учетом того, что в диссертационной работе рассматривается исследование микромеханических акселерометров. В этом случае справедливы следующие оценки и допущения:

- 1) дополнительное смещение нуля из-за вариации температуры окружающей среды:

$$\Delta W_T = k_T \cdot \Delta T = k_T \cdot \dot{T} \cdot t,$$

где k_T – тепловой дрейф сдвигов нулей акселерометров; ΔT – изменение температуры за время испытания, \dot{T} – скорость изменения температуры; t – время испытания. Для аналитической оценки с учетом выполнения требований по нормальным условиям, когда скорость изменения температуры не превышает 10°C/ч, за 1 минуту дополнительный сдвиг нуля составит величину $\Delta W_T \approx 0,2 \text{ mg}$.

- 2) влияние динамической погрешности ДУ испытательного стенда $\Delta\lambda_{\lambda_i}$:

$$\Delta W_{\Delta\lambda_{\lambda_i}} = \Delta\lambda_{\lambda_i} \cdot g = \tau \cdot \dot{\lambda}_i(t) \cdot g,$$

где τ – время задержки выходного сигнала ДУ.

В настоящее время при создании испытательных поворотных стендов нашли широкое применение фотоэлектрические преобразователи угла с $\tau=10\mu\text{с}$, при $\dot{\lambda}_i=75^\circ/\text{с}$, дополнительная погрешность составит $\Delta W_{\Delta\lambda_{\lambda_i}} = 0,01 \text{ mg}$.

- 3) погрешность линеаризации:

По (3) и (4), одна из частей второго порядка проекции ускорения на ось чувствительности акселерометра x является:

$$\begin{aligned}\Delta W_x^{\text{II}} = & \sin \lambda_1 W_x (-\alpha_y \cos \lambda_2 + \beta_z \cos \lambda_2 - \beta_z \sin \lambda_2) \Delta \lambda_2 + \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \gamma_y \Delta W_z + \\ & + (\sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \Delta W_y \gamma_z + \sin \lambda_1 \cos \lambda_2 W_z \gamma_y) \Delta \lambda_2 - \sin \lambda_1 \sin \lambda_2 \alpha_y \Delta W_x + \cos \lambda_1 \alpha_x \Delta W_y + \\ & + \sin \lambda_1 \cos \lambda_2 (\Delta \lambda_2 - \gamma_z) \Delta W_y - \cos \lambda_1 \beta_x \Delta W_z - \sin \lambda_2 \Delta \lambda_2 \Delta W_z.\end{aligned}$$

В этом случае при углах неортогональностей осей чувствительностей акселерометров триады порядка 1° , суммарной погрешности ДУ испытательного стенда $\Delta \lambda_2 = 30$ угл. мин., оцениваемой вариации сдвига нуля ММА относительно его паспортного значения $\Delta W_i = 10\text{mg}$, погрешность проведенной линеаризации составит $\Delta W_x^{\text{II}} = 0,2\text{mg}$.

Глава 3 посвящена выработке требований к средству испытаний и имитационному моделированию в среде Matlab с целью подтверждения эффективности использования динамического метода исследований погрешностей триады ММА.

Коэффициенты математической модели триады ММА, полученные в статическом режиме испытаний, зависят от погрешностей ДУ стенда и его начальной выставки относительно плоскости горизонта. Например, для z -акселерометра:

$$\begin{aligned}\delta W_{z_0} = & g \cdot \Delta \psi \cdot K_z; \frac{\delta K_z}{K_z} = (\Delta \theta + \Delta \lambda_1) \cdot \beta_x + \Delta \lambda_2 \cdot \gamma_y; \\ \Delta \beta_x = & -(\Delta \theta + \Delta \lambda_1); \Delta \gamma_y = -\Delta \psi - \Delta \lambda_2.\end{aligned}\quad (6)$$

В результате варьирования (1), было получено выражение для погрешности акселерометра в зависимости от погрешностей коэффициентов математической модели:

$$\begin{aligned}\Delta W_z = & \frac{\delta K_z}{K_z} \cdot W_z - \Delta \beta_x \cdot W_x + \Delta \gamma_y \cdot W_y + \delta W_{z_0} \\ \approx & \Delta \psi g - W_y (\Delta \psi + \Delta \lambda_2) + W_x (\Delta \theta + \Delta \lambda_1),\end{aligned}$$

которое, учитывая (6), может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta W_z \approx \Delta \psi g - W_y (\Delta \psi + \Delta \lambda_2) + W_x (\Delta \theta + \Delta \lambda_1).$$

Рассмотрим случай исследования погрешностей акселерометра с диапазон измерений $\pm ng$. Считая, что погрешности выставки стенда в горизонте $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, углы неортогональностей и погрешности ДУ имеют одинаковый порядок $|\Delta \psi|$, верхний предел погрешности составит:

$$|\Delta W_z| = (1 + 2n) g |\Delta \psi| \quad (7)$$

Отношение (7) позволяет определить предельную допустимую погрешность выставки стенда и ДУ, чтобы удовлетворялось требование к точности оценки коэффициентов математической модели (1), которое формируется выражением (6).

Погрешность задания длины плеча, как было отмечено в главе 1, является одним из основных источников погрешностей испытания акселерометров методом центрифуги. При этом требование к точности оценки радиус-вектора ΔR определяется из выражения:

$$\delta W_0 = \dot{\lambda}^2 \Delta R \quad (8)$$

Например, при испытании акселерометров с точностью 10mg в диапазоне измерений $\pm 2g$, при максимальной задаваемой испытательным стендом угловой скорости $\dot{\lambda} = 75^\circ/\text{с}$, выработаны требования к стенду и ДУ (табл. 2).

Табл.2

Требование к стенду		Требуемая точность испытания триады ММА			
$\Delta\psi$ ($\Delta\theta$), угл.мин.	$\Delta\lambda$, угл.мин.	δW_0 , мг	δK , %	$\delta\alpha$, угл.мин.	ΔR ,мм
2	2	0,6	0,012	4	3,5

Проверка эффективности предложенного в главе 2 динамического метода выполнялась методом имитационного моделирования в среде Matlab. При этом закон угловых колебаний задавался таким образом, чтобы каждая ось чувствительности триады ММА поочередно проходила положения, используемые в стандартном (статическом) методе испытаний:

$$\lambda_1(t) = \lambda_{10} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_1}\right), \lambda_2(t) = \lambda_{20} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_2}\right), \quad (9)$$

где $\lambda_{10}=360^\circ$; $\lambda_{20}=90^\circ$; $2T_1=5T_2$, при $T_2=12$ с, исходя из условия $\max\{\dot{\lambda}_1, \dot{\lambda}_2\} = 75^\circ/\text{с}$.

Радиус-вектор составлял $R = (x_2, y_2, z_2) = (133 \text{ мм}; 25 \text{ мм}; 36 \text{ мм})$.

Средние квадратические отклонения погрешностей триады ММА задавались исходя из паспортных характеристик, предоставляемых производителем Analog Devices (табл. 3):

Табл. 3

σ_{W_i} , мг	σ_K , %	σ_α , °	$\sigma_{\delta W^{III}}$, мг
15	1	1	15

Начальные условия при моделировании приведены в табл. 4, в столбце «Задано», а результат использования ОФК в столбце «Получено». Следует отметить, что все параметры были оценены с требуемой точностью. Кроме этого, даже при введении неточности начальной выставки больше чем определенной табл. 2, предложенный динамический метод обеспечивает требования инвариантности к данному источнику погрешности.

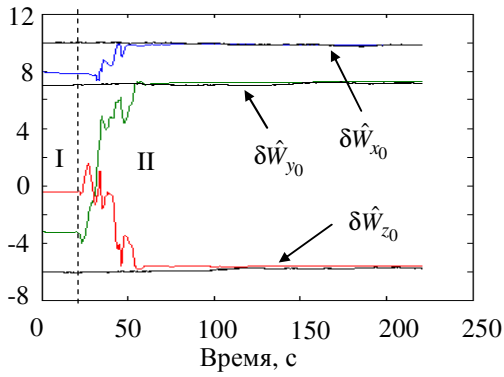
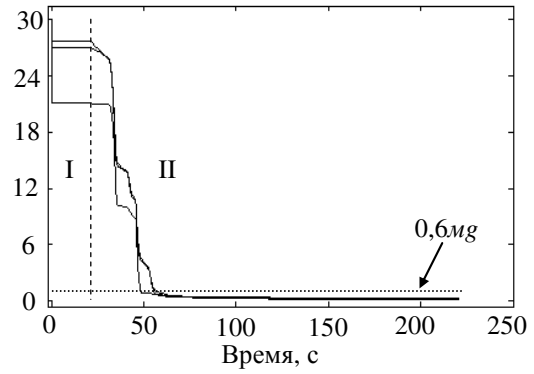
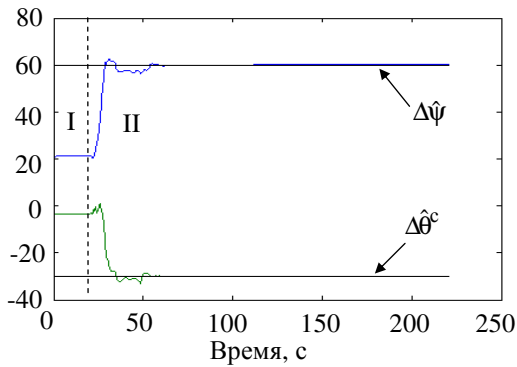
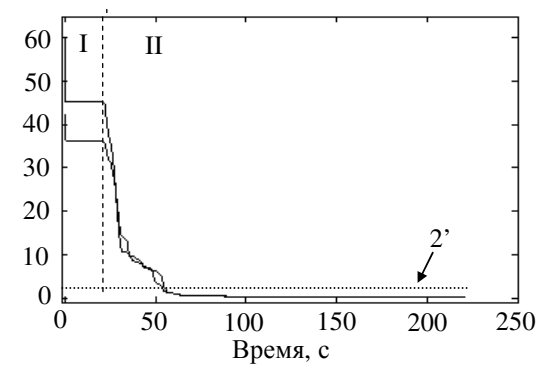
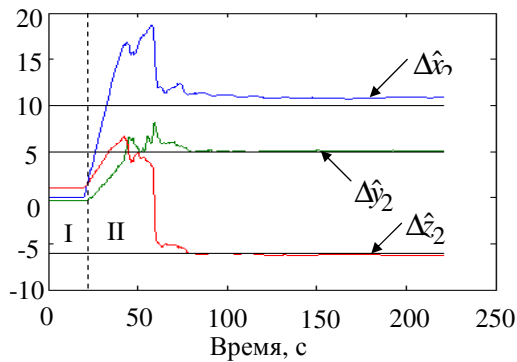
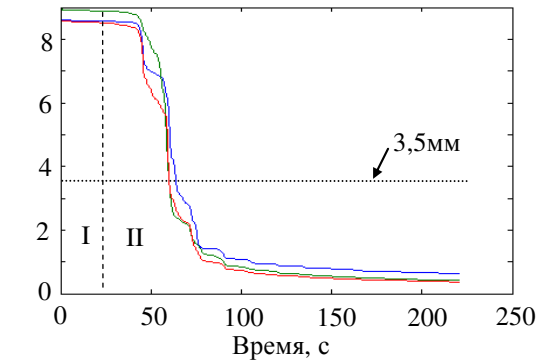
Табл. 4

Параметры	Ед.	Эксперимент № 1		Эксперимент № 2	
		Задано	Получено	Задано	Получено
$\Delta\psi; \Delta\theta^c$	угл. мин.	(30,0; -20,0)	(30,0; -20,1)	(-60,0; 30,0)	(-59,9; 30,1)
$\Delta x_2; \Delta y_2; \Delta z_2$	мм	(15,0; 9,0; 5,0)	(16,0; 9,0; 5,2)	(10,0; 5,0; -6,0)	(10,80; 5,0; -6,2)
$\delta W_{x_0}; \delta W_{y_0}; \delta W_{z_0}$	мг	(10; 6,8; -6)	(10,1; 6,9; -5,9)	(10; 6,8; -6)	(9,9; 6,9; -6)
$\delta K_x; \delta K_y; \delta K_z$	%	(0,50; 1,00; -1,50)	(0,51; 9,98; -1,52)	(0,50; 1,00; -1,50)	(0,50; 1,00; -1,51)
$[\alpha_x; \alpha_y; \beta_x; \beta_z; \gamma_y; \gamma_z]$	угл. мин.	(-18; 30; -24; -12; 18; -30)	(-18,2; 30,5; -23,8; -12,4; 18,2; -29,5)	(-18; 30; -24; -12; 18; -30)	(-18; 30,4; -23,8; -12,5; 18,1; -29,6)

На рис. 6-11 показаны оценки сдвигов нулей, погрешностей выставки испытательного стенда, радиус-вектора, а также результат работы ковариационного канала ОФК. Вертикальные пунктирные линии на рисунках разделяют 2 режима: I – неподвижный режим; II – колебательный режим.

Из анализа графиков 6-11 и табл. 4 могут быть отмечено следующее:

- все элементы вектора состояния (5) наблюдаемы, из чего следует подтверждение обеспечения инвариантности к погрешности выставки стенда относительно плоскости горизонта (табл. 4);
- динамический метод позволяет оценить положение триады относительно приборной системы координат ΔR с необходимой точностью (1мм);
- время переходного процесса ОФК составило порядка 1 мин. При этом достигнуты точности оценки параметров математической модели (1), которые в случае использования статического метода потребовали бы проведение испытаний в течение 40 минут.

Рис. 6 – Оценки сдвигов нулей MMA $\delta\hat{W}_{i_0}$, [mg]Рис. 7 – SKO оценки сдвигов нуля MMA $\sigma_{\delta\hat{W}_i}$, [mg]Рис. 8 – Оценки $\Delta\hat{\psi}$ и $\Delta\hat{\theta}^c$, [угл. мин.]Рис. 9 – SKO оценки $\Delta\hat{\psi}$ и $\Delta\hat{\lambda}_1^c$, [угл. мин.]Рис. 10 – Оценки $\Delta\hat{R}$, [мм]Рис. 11 – SKO оценки $\sigma_{\Delta\hat{R}}$, [мм]

В главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований, которые проводились для триады MMA компании Analog Devices – ADXL325 (см. рис. 12) на двухосевом стенде СДА-15 (рис.13).

Характеристики акселерометров ADXL325:

- Смещение нуля: 1,5В;
- Чувствительность: 174 мВ/g.

Дополнительная процедура, о необходимости которой отмечалось в главе 2, производилась после начальной выставки стенда:

- 1) Повернуть стенд на угол $\lambda_1=90^\circ$; $\lambda_2=0^\circ$ (рис. 13);
- 2) Выставить ось O_{Sy_2} в плоскости горизонта с помощью уровня ($\Delta\epsilon = \pm 30''$) (рис. 13).

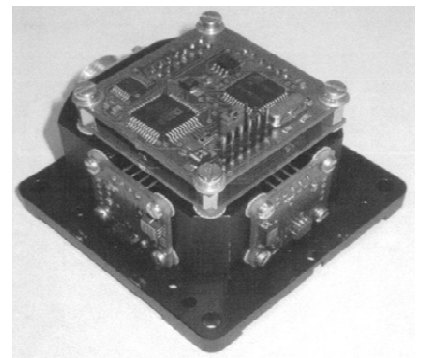


Рис. 12 – Испытуемый ИИМ

С учетом малости $\Delta\theta^c$, справедливо:

$$z_{\Delta\psi-\Delta\lambda_2} = \Delta\psi - \Delta\lambda_2 = \pm\Delta\varepsilon.$$

Положения осей y_S и y_2 на стенде:

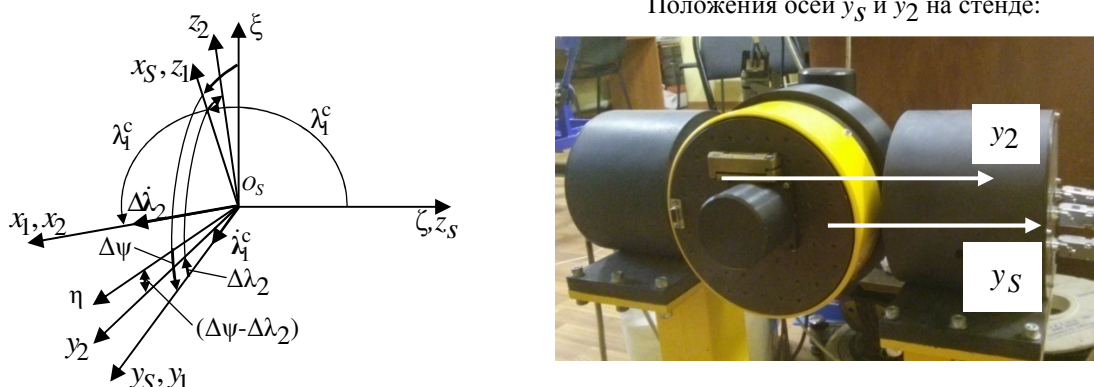


Рис.13 – Дополнительная процедура

Стендом задавались угловые колебания согласно (9). В рамках исследований были проведены 3 эксперимента:

1) Эксперимент №1 – испытания триады ММА по стандартному статическому методу, предполагающему угловые позиционирования относительно вектора ускорения свободного падения. При этом были выполнены требования по выставке испытательного стенда относительно плоскости горизонта ($\psi = 0$; $\theta^c = 0$) – контроль осуществлялся с помощью квадранта (± 30 угл.сек). Результаты сведены в табл.5, где в столбце «Паспортные» приведены данные паспорта на серию трехосного ММА ADXL325 от фирмы-производителя Analog Devices.

Табл. 5

Параметры	Паспортные	Эксперимент №1	Эксперимент №2	Эксперимент №3
		Стандартный метод	Динамический метод	
		$\psi = 0$; $\theta^c = 0$		$\psi = -30^\circ$; $\theta^c = 40^\circ$
$[\hat{K}_x; \hat{K}_y; \hat{K}_z]$, мВ/г	174	171,5 175,8 174,7	171,5 175,7 174,7	171,5 175,8 174,8
$[\hat{W}_{x_0}; \hat{W}_{y_0}; \hat{W}_{z_0}]$, мВ	1500	1504,2 1500,2 1495,5	1504,2 1504,3 1504,3	1504,2 1504,2 1504,3
$[\alpha_y; \beta_z; \alpha_x; \gamma_z; \beta_x; \gamma_y]$	-	-30'; 30'; 15'; 1°12'; 10'; 2°23'	-31'; 27'; 16'; 1°6'; 12'; 2°18'	-32'; 26'; 16'; 1°4'; 11'; 2°20'
$[\hat{\psi}; \hat{\theta}^c]$	-	-	[-3'; 2']	[-33'; 43']
$[\Delta\hat{x}_2; \Delta\hat{y}_2; \Delta\hat{z}_2]$, мм	-	-	[-9; 15; 2]	[-7; 16; 4]
Длительность испытаний, мин.	-	40	1,5	

2) Эксперимент №2 – после окончания Эксперимента №1 (в том же запуске) был реализован динамический метод исследования погрешностей триады ММА. На рис. 14 и рис. 15 приведены переходные процессы при оценке смещений нулей и масштабных коэффициентов – установившиеся значения соответствуют результатам Эксперимента №1 (на рисунках показаны горизонтальными линиями черного цвета).

3) Эксперимент №3 – не выключая аппаратуры после окончания Эксперимента №2, были заданы ненулевые значения углов рассогласования осей сенда и плоскости горизонта ($\psi = -30$ угл.мин; $\theta^c = 40$ угл.мин) – контроль осуществлялся с помощью квадранта (± 30 угл.сек).

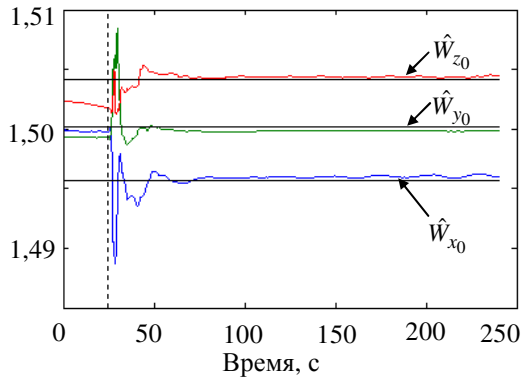


Рис. 14. Оценки смещений нулей MMA \hat{W}_{i_0} , [В]

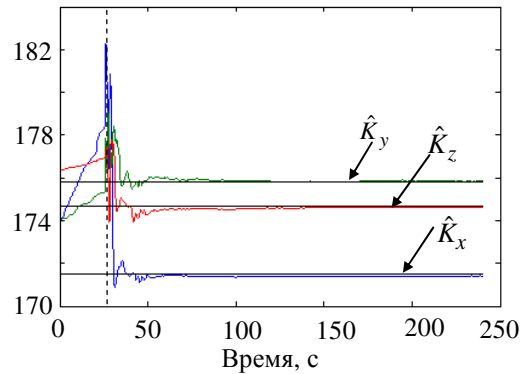


Рис. 15. Оценки масштабных коэффициентов MMA \hat{K}_i , [мВ/г]

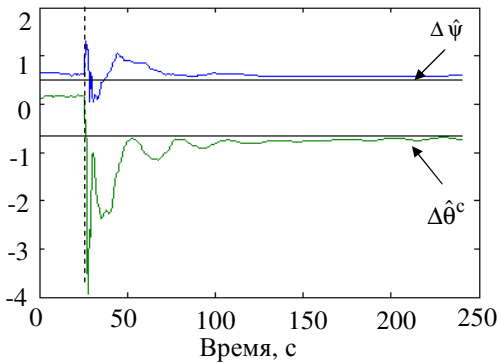


Рис. 16. Оценки $\Delta\hat{\psi}$ и $\Delta\hat{\theta}^c$, °

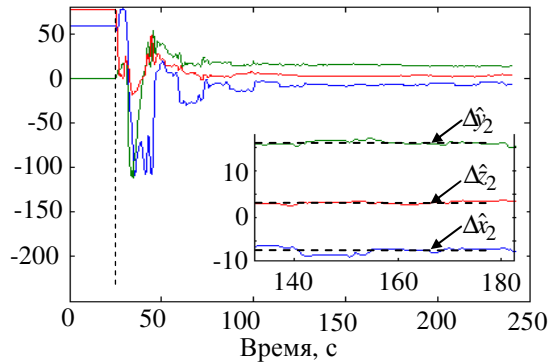


Рис. 17. Оценки $\Delta\hat{R}$, [мм]

Достоверность предложенного динамического метода подтверждается достаточной степенью повторения результата стандартного метода (табл. 5). Сопоставляя оценки неточности выставки сенда относительно плоскости горизонта, видно, что отличие результата Эксперимента №3 (см. рис. 16) от Эксперимента №2 соответствует заданным углам (табл. 5), а ненулевые оценки в Эксперимент №2 не приносят в погрешность более 1мг.

В отличие от стандартного метода, предложенный метод позволяет оценить положение акселерометров (рис. 17) относительно приборной системы координат инерциального модуля. На рис. 18 приведены координаты геометрического центра испытуемого модуля (точка Ц) относительно центра качания, задаваемого испытательным стендом ($H; W; L$) = (30мм; 20мм; 20мм), которые были использованы в ОФК в качестве априорной информации. В свою очередь из конструк-

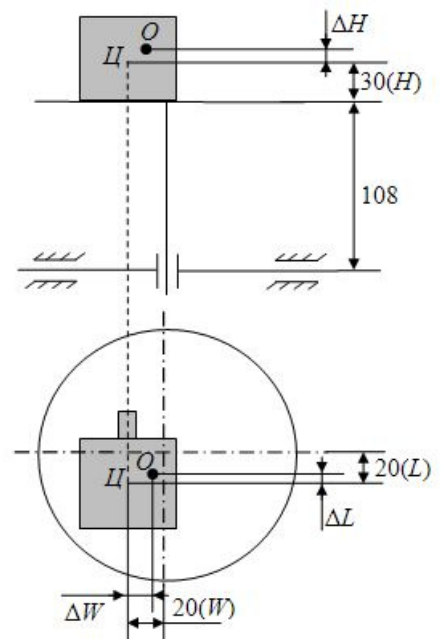


Рис. 18. Положение триады MMA

торской документации производителя следует, что микросхемы ADXL325 (положение точки O) характеризуются отстоянием от C на $(\Delta H; \Delta W; \Delta L) = (-\Delta x_2; -\Delta y_2; -\Delta z_2) = (7\text{мм}; -15\text{мм}; 4\text{мм})$, которые собственно и должны оцениваться ОФК (5), используемым динамическим методом. В табл. 5 приведены результаты оценки – расхождение не превысило 2мм, что удовлетворяет требованиям табл. 2. При реализации динамического метода на производстве, данное свойство может выступать для производителя инерциальных модулей, у которого, безусловно, имеется информация о величинах $(\Delta H; \Delta W; \Delta L)$, в качестве критерия корректности настроек ОФК и, соответственно, достоверности полученных оценок параметров математической модели показаний триады акселерометров (1).

Заключение

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Анализ существующих методов испытаний акселерометров показал, что для обеспечения потребностей производителей микромеханических инерциальных датчиков и малогабаритных систем на их основе, актуальным является разработка динамического метода исследований погрешностей триад ММА, обладающего инвариантностью к неточности выставки средства испытаний и позволяющего обеспечить точность стандартного метода калибровки за меньшее время.

2. Предложен динамический метод, основанный на использовании процедуры комплексирования показаний триады ММА и датчиков углов стенда по схеме оптимального фильтра Калмана, который при реализации режима квазигармонических угловых колебаний позволил реализовать процедуру оценки параметров математической модели (1) и обеспечить наблюдаемость оценок погрешностей неточности выставки стенда относительно плоскости горизонта.

3. В работе получены аналитические соотношения (6)-(8), позволяющие, исходя из требований по точности испытаний триады ММА и методических погрешностей, сформулировать требования к стенду по точности задания угловых положений. Инвариантность динамического метода к точности начальной выставки стенда позволяет (по отношению к основанию) ограничиться кратковременной стабильностью (3 угл.мин за 1,5 мин, см. табл. 5), что существенно, так как снимает требования по строительству «развязанного» фундамента.

4. Проверка эффективности предложенного метода выполнялась путем имитационного моделирования в среде Matlab. Созданное программное обеспечение позволяет не только исследовать предложенный динамический метод (табл. 4), но и может быть использовано в учебном процессе при изучении точностных характеристик триад акселерометров различного класса точности в условиях эксплуатации на подвижных объектах.

5. Результаты экспериментальных исследований погрешностей триады ММА (ADXL325) выполнялись на двухосном стенде СДА-15 и подтвердили инвариантность динамического метода к неточности выставки стенда с обеспечением точности 10мг. При этом время проведения исследований составило 1,5 мин. в то время как стандартный метод калибровки требует 40 мин (табл. 5).

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (задание №8.1068.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности).

Цитируемая литература:

1. Синельников, А.Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки –М.; Изд-во стандартов, 1979. – 176 с.
2. Климкович, Б.В. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов. - Гироскопия и навигация. – 2014. – № 3. – С. 29-40.
3. Измайлов, Е.А. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е.А. Измайлов, С.Н. Лепе, А.В. Молчанов, Е.Ф. Поликовский // XV МКИНС. – СПб. – 2008. – С. 145 - 154.
4. Челпанов, И.Б. Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов/ И.Б. Челпанов, М.И. Евстифеев, А.В. Кочетков // Приборы. – 2014. – № 4(166). – С.16 – 20.
5. Боронахин, А.М., Лукьянов, Д.П., Филатов Ю.В.. Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: ООО «Техномедиа»/ Изд-во «Элмор», 2008. 400с.
6. Шаврин, В.В. Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах / В.В. Шаврин, А.С. Конаков, В.И. Тисленко // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРа.– 2012. – № 1 (25). – С .265-269.
7. IEEE Std 836-2009 «IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers».

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Дао Ван Ба, Чан Танг Дык, Ле Ван Чанг, Оптимизация алгоритмов инерциальной навигационной системы надводных объектов. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 4/2014 с.58-62.
2. Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг, Шалымов Р.В. Динамическая калибровка триады акселерометров на двухосном стенде. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 8/2014с.72-76.

Другие статьи и материалы конференций:

3. Yu.V. Filatov, A.M. Boronakhin, V.B. Dao, V.T. Le. Sensor information processing for calibration of inertial measurement units/ Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS, 2014.
4. Yu.V. Filatov, A.M. Boronakhin, V.B. Dao, V.T. Le. Dynamic calibration method of inertial measurement units/ Microsystem Technologies, 1, 2015.
5. Дао Ван Ба, А.М.Боронахин, П.А.Иванов, И.Л.Суров, М.А. Лебедева, А.В. Маляева, Ле Ван Чанг. Результаты испытаний микромеханического модуля/ Сборник докладов 64 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 25 января - 5 февраля, 2011 г., С. 173-176
6. Дао Ван Ба, Чан Танг Дык, Ле Ван Чанг. Системы навигации в задачах управления движением надводными объектами// 66-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, СПбЭТУ «ЛЭТИ» 2013, Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, 1-8 февраля 2013 г. СПб. С. 208-212.
7. Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг. Динамическая калибровка акселерометров// 68-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, СПбЭТУ «ЛЭТИ» 2015, Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, 28 февраля – 05 марта 2015 г. Санкт Петербург. С.189-193.