

УДК 629.7.05

На правах рукописи

Мьинт Хтун Наинг

**МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА – 2015

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'X' followed by a long diagonal stroke.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации.

Научный руководитель: **Егоров Юрий Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Беркович Сергей Борисович**,
доктор технических наук, профессор,
МОУ «Институт инженерной физики»

Колбас Юрий Юрьевич,
кандидат технических наук,
ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Ведущая организация: **Филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им.
академика В.И. Кузнецова»**

Защита диссертации состоится 11 февраля 2015 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5., стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан « » декабря 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук

Д.А Семеренко

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2066733

Методика калибр

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Существенное влияние на точность работы инерциальных навигационных систем (ИНС) оказывают инструментальные погрешности блока акселерометров (БА). К основным инструментальным погрешностям блока акселерометров относятся смещения нулей, отклонения масштабных коэффициентов и ошибки выставки. С целью снижения влияния инструментальных погрешностей блока акселерометров на точность ИНС применяют их калибровку, в результате получают оценки смещений нулей, отклонений масштабных коэффициентов и ошибок выставки акселерометров, которые используют в алгоритмах решения навигационной задачи.

Исследованиями многих российских и зарубежных авторов установлено, что точность калибровки блока акселерометров будет в основном зависеть от программы и алгоритмов калибровки, условий проведения испытаний, точности установки блока акселерометров на испытательном стенде, точности выставки испытательного стенда, инструментальных погрешностей испытательного стенда. В связи с этим разработка методики калибровки блока акселерометров ИНС, включающей обеспечение условий инвариантности относительно ошибок испытательного стенда в процессе калибровки, синтез оптимальных программ и алгоритмов калибровки и исследование их характеристик, является актуальной научной задачей, на решение которой направлена диссертационная работа.

Целью диссертационной работы является повышение точности и достоверности оценки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС путём разработки и применения инвариантной относительно ошибок выставки и инструментальных погрешностей стенда методики калибровки. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Разработка математической модели процессов калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС;
2. Исследования условий инвариантности уравнений процесса калибровки блока акселерометров ИНС относительно ошибок испытательного стенда;
3. Синтез оптимальных программ калибровки блока акселерометров ИНС, инвариантных к ошибкам выставки и инструментальным погрешностям испытательного стенда;
4. Исследование точностных характеристик синтезированных программ калибровки блока акселерометров ИНС.
5. Разработка прикладного алгоритма калибровки блока акселерометров ИНС.
6. Экспериментальное подтверждение характеристик разработанной методики.

Задачи исследования

В работе использовались методы теории инерциальных навигационных систем, теории линейных векторных пространств, теории динамических систем

и теория оценивания динамических систем. При расчетах и моделировании применялись пакеты прикладных программ Matlab и LabView.

Научная новизна

В диссертационной работе получены новые научные результаты теоретического и прикладного характера:

1. Синтезирована математическая модель процессов калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС по методу пространства состояний (векторно-матричной форме), учитывающая калибруемые параметры блока акселерометров, ошибки выставки блока акселерометров на стенде и инструментальные погрешности стенда.
2. Определены условия инвариантности уравнений процесса калибровки блока акселерометров инерциальных навигационных систем относительно малых ошибок выставки блока акселерометров на испытательном стенде и инструментальных погрешностей испытательного стенда.
3. Получено семь оптимальных (субоптимальных) программ калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС с применением критерия максимального подавления влияния измерительного шума на результаты калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС. Синтезированные оптимальные программы калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС обладают различной степенью избыточности в зависимости от степени учета информационных свойств матриц измерений и свойствами инвариантности относительно ошибок выставки и инструментальных погрешностей стенда.
4. Исследованы точностные характеристики синтезированных программ калибровки и выделена наиболее полно удовлетворяющая предъявленным требованиям (выполнение критерия максимального подавления влияния измерительного шума и рациональная трудоемкость процесса калибровки) программа калибровки, имеющая минимальное число измерительных положений.
5. Разработан прикладной алгоритм калибровки блока акселерометров ИНС.
6. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают эффективность разработанной методики.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработанный метод калибровки блока акселерометров ИНС обеспечивает достаточную точность калибровки без предъявления высоких требований к испытательному стенду.
2. Предлагаемые оптимальные программы калибровки блока акселерометров инерциальных навигационных систем могут быть использованы в процессе автономных испытаний акселерометров ИНС.

3. Разработанный метод калибровки блока акселерометров ИНС может быть использован при калибровке параметров ИНС в условиях эксплуатации.

Защищаемые положения

На защиту выносятся следующие новые положения и результаты, полученные в диссертационной работе:

- Математическая модель процессов калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС на стенде;
- Результаты исследования условий калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС, инструментальных погрешностей испытательного стенда и условий инвариантности;
- Методика и результаты синтеза оптимальных программ калибровки блока акселерометров ИНС, инвариантных к ошибкам выставки и инструментальным погрешностям испытательного стенда;
- Результаты исследования точностных характеристик синтезированных программ калибровки БА.
- Прикладной алгоритм калибровки блока акселерометров ИНС.
- Результаты экспериментальных исследований, подтвердивших характеристики разработанной методики.

Внедрение результатов работы

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в учебный процесс кафедры приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации (ИУ-2) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» для выполнения лабораторных работ, проведения лекционных занятий.

Апробация работы и публикации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Всероссийской межвузовской научно-практической конференции (Москва, 2011г), на XIII Международном симпозиуме «Уникальные феномены и универсальные ценности культуры» (Москва, 2011г), на XIV Международном симпозиуме «Уникальные феномены и универсальные ценности культуры» (Москва, 2012г), на XXXVI, XXXVII, XXXVIII Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2012г, 2013г, 2014г), на региональной научно-технической конференции (Калуга, 2014г).

Публикации

Основные положения диссертации изложены в одиннадцати публикациях, в том числе – в четырех статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы

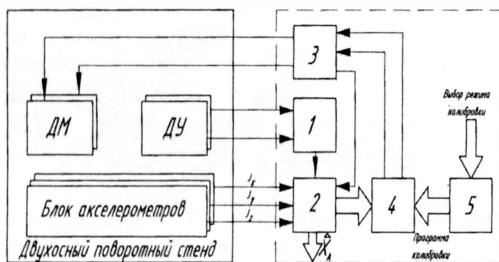
Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 84 наименований. Материал изложен на 136 страницах, представлен 37 рисунками и 52 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и основные задачи, приведены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание глав диссертации.

В первой главе изложены общие требования к калибровке блока акселерометров ИНС, представлена и описана функциональная схема установки калибровки блока акселерометров ИНС, а также разработана математическая модель процессов калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС. Анализ решений уравнений навигации показывает, что определение скорости, углов ориентации и координат навигационной системы зависит от инструментальных погрешностей чувствительных элементов системы, которые определяются заранее и потом учитываются в алгоритмах работы. В связи с этим требуется калибровать чувствительные элементы инерциальной системы навигации. Калибровку блока акселерометров ИНС проводят на специальных испытательных стендах, которые имеют несколько осей вращения относительно базового вектора ускорения силы тяжести. Развитие методов и средств калибровки блока акселерометров ИНС, а также широкое распространение ИНС требует использовать автоматизированные методы с минимальным применением высокоточного дорогостоящего оборудования.

На Рис. 1. представлена функциональная схема автономной калибровки блока акселерометров ИНС. Блок акселерометров установлен на вращающемся двухосном испытательном стенде, который имеет две оси вращения. Сигналы от датчиков углов стенда через аналого-цифровые преобразователи 1 поступают на блок алгоритмов калибровки. От блока алгоритмов калибровки 2 и блока программ калибровки 5 информация поступает на блок алгоритмов управления 4, который формирует сигнал блока управления двигателями 3 вращения наружной и внутренней осей стенда. На блок алгоритмов калибровки также поступают выходные сигналы блока акселерометров ИНС, необходимые для выполнения расчетов калибруемых параметров блока акселерометров инерциальных навигационных систем.



В блоке управления (3) в соответствии с законом управления от блока алгоритмов управления (4) и программой калибровки от блока программ калибровки формируется управляющий сигнал для разворота двухосного поворотного стенда. Блок алгоритмов калибровки (2) на основании сигналов с датчиков угла стенда

и выходных сигналов блока акселерометров. В результате на выходе блока алгоритма калибровки в каждом измерительном положении программы калибровки формируются оценки калибруемых параметров блока

акселерометров. Для корректного описания параметров потребовалось ввести 9 систем координат.

На Рис. 2. представлены связи между матрицами переходов систем координат, где: $Ox_B Y_B Z_B$ – базовая система координат ($OENL$); система координат $Ox_{cm} Y_{cm} Z_{cm}$ характеризует положение испытательного стенда относительно базовой системы координат; система координат $Ox_{cm1} Y_{cm1} Z_{cm1}$ показывает поворот вокруг наружной оси стенда; система координат $Ox_{cm2} Y_{cm2} Z_{cm2}$ характеризует ошибку разворота датчика угла вокруг наружной оси стенда; система координат $Ox_{cm3} Y_{cm3} Z_{cm3}$ характеризует ошибки перекосов осей стенда; система координат $Ox_{cm4} Y_{cm4} Z_{cm4}$ описывает поворот вокруг внутренней оси стенда; система координат $Ox_{cm5} Y_{cm5} Z_{cm5}$ характеризует ошибку разворота датчика угла вокруг внутренней оси стенда; $Ox_n Y_n Z_n$ – приборная система координат; система координат $Ox_A Y_A Z_A$ связана с входными измерительными осями акселерометров.

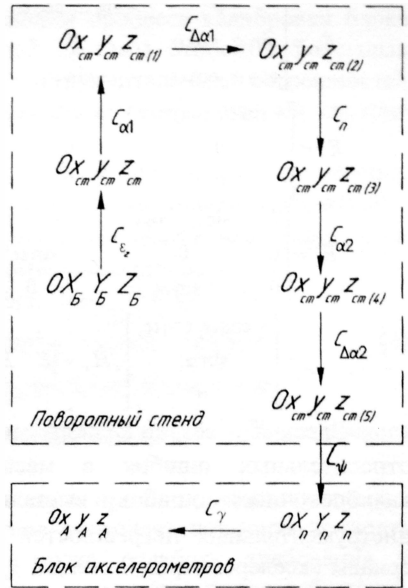


Рис. 2. Граф. взаимосвязи между введенными системами координат

Математическая модель измерений для калибровки блока акселерометров ИНС с учетом матриц перехода, модели ошибок блока акселерометров и инструментальных погрешностей стенда имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \partial J_x &= \Delta_x + \delta k_x \sin \alpha_1 + \gamma_2^x \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 + \gamma_3^x \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \psi_y \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 + \\
 &\quad + \psi_z \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \gamma_{n2} \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 + \gamma_{n3} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \Delta \alpha_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2; \\
 \partial J_y &= \Delta_y + \delta k_y \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \gamma_1^y \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \gamma_3^y \sin \alpha_1 - \psi_x \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \\
 &\quad - \psi_z \sin \alpha_1 - \gamma_{n3} \sin \alpha_1 - \Delta \alpha_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \Delta \alpha_1 \sin \alpha_1 - \varepsilon_{z1} \sin \alpha_2 \cos \alpha_1; \\
 \partial J_z &= \Delta_z - \delta k_z \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \gamma_1^z \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \gamma_2^z \sin \alpha_1 - \psi_x \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \\
 &\quad + \psi_y \sin \alpha_1 + \gamma_{n2} \sin \alpha_1 - \Delta \alpha_2 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \Delta \alpha_2 \sin \alpha_1 - \varepsilon_{z1} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Или в векторно-матричном виде:

$$\partial \bar{J} = [H_A \quad H_\varepsilon] \begin{bmatrix} \bar{X}_A \\ \bar{X}_\varepsilon \end{bmatrix} + \bar{w}_A, \tag{2}$$

где введены следующие векторы и матрицы:

$$\bar{X}_A = \begin{bmatrix} \Delta \\ \delta \bar{k} \\ \bar{\gamma} \end{bmatrix}, \quad \delta \bar{k} = \begin{bmatrix} \delta k_x \\ \delta k_y \\ \delta k_z \end{bmatrix}, \quad \bar{X}_\varepsilon = [\bar{\psi} \quad \Delta \alpha_2 \quad \bar{\gamma}_n \quad \Delta \alpha_1 \quad \varepsilon_{z1}]^T, \quad \bar{\gamma}_n = \begin{bmatrix} \gamma_{n2} \\ \gamma_{n3} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\gamma} = [\gamma_2^x \quad \gamma_3^x \quad \gamma_1^y \quad \gamma_3^y \quad \gamma_1^z \quad \gamma_2^z]^T, E_k = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \end{bmatrix},$$

$$E_\psi = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & -\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & 0 & \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_1 & 0 \end{bmatrix}, E_{\Delta \alpha_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \end{bmatrix},$$

$$E_\gamma = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & -\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_1 \end{bmatrix},$$

$$E_n = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & -\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ 0 & 0 & \sin \alpha_1 \\ 0 & -\sin \alpha_1 & 0 \end{bmatrix}, E_\epsilon = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{\Delta \alpha_1} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \\ \sin \alpha_1 \\ 0 \end{bmatrix}, H_A = [E \quad E_k \quad E_\gamma], H_\epsilon = [E_\psi \quad E_{\Delta \alpha_2} \quad E_n \quad E_{\Delta \alpha_1} \quad E_\epsilon].$$

Здесь $\bar{X}_A$ – вектор калибруемых параметров БА; $\bar{\delta k}$ – вектор калибруемых относительных ошибок в масштабных коэффициентах БА; $\bar{\gamma}$ – вектор калибровочных ошибок выставки триады акселерометров; $\bar{X}_\epsilon$ – вектор инструментальных погрешностей испытательного стенда, ошибок выставки триады акселерометров и стенда; $\bar{\gamma}_n$ – вектор перекосов внутренней и наружной осей испытательного стенда; H_A – матрица наблюдений для вектора калибруемых параметров триады акселерометров $\bar{X}_A$; H_ϵ – матрица наблюдений для вектора инструментальных погрешностей $\bar{X}_\epsilon$; $\bar{\omega}_A$ – вектор безразмерного измерительного шума триады акселерометров.

Задача калибровки блока акселерометров ИНС состоит в получении оценок вектора $\bar{X}_A$ (12 компонент), при влиянии параметров задаётся вектором $\bar{X}_\epsilon$ (8 компонент) (Таблица 1).

Таблица 1

калибруемые параметры модели БА												
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Δ_x	Δ_y	Δ_z	δk_x	δk_y	δk_z	γ_1^y	γ_1^z	γ_2^z	γ_2^x	γ_3^z	γ_3^y
инструментальные погрешности стенда												
№	13	14	15	16	17	18	19	20				
	ψ_x	ψ_y	ψ_z	$\Delta \alpha_2$	$\Delta \alpha_1$	γ_{n2}	γ_{n3}	ϵ_{x1}				

Во второй главе проведен анализ модели процесса калибровки блока акселерометров ИНС на стенде. Из анализа следует, что точность калибровки

блока акселерометров (вектор $\bar{X}_A$) будет зависеть не только от степени подавления влияния измерительного шума на результаты калибровки, но и от компенсации влияния ошибок выставки блока акселерометров на испытательном стенде и погрешности испытательного стенда (вектор $\bar{X}_\epsilon$). Рассмотрены условия инвариантности уравнений процесса калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы относительно малых ошибок выставки блока на стенде и инструментальных погрешностей инструментального стенда путём преобразований к географической системе координат.

В результате получено уравнение, которое не содержит составляющих, обусловленных вектором $\bar{X}_\epsilon$, то есть инвариантно не только относительно малых ошибок выставки блока акселерометров на испытательном стенде, но и всех инструментальных погрешностей испытательного стенда:

$$\begin{aligned} \partial J_L = & \Delta_x \sin \alpha_1 + \Delta_y \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \Delta_z \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 + \delta k_x \sin^2 \alpha_1 + \\ & + \delta k_y \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 + \delta k_z \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_1 + \gamma_{12} \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \times \\ & \times \cos \alpha_2 + \gamma_{13} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 + \gamma_{23} \sin \alpha_1 \cos^2 \alpha_1 \cos \alpha_2 + \omega_L, \end{aligned} \quad (4)$$

где $(\gamma_1^x - \gamma_1^y) = \gamma_{23}$, $(\gamma_2^x - \gamma_2^z) = \gamma_{13}$ и $(\gamma_3^x - \gamma_3^y) = \gamma_{12}$ - углы перекоса входных осей акселерометров.

Применение данных условий инвариантности при построении программ и алгоритмов калибровки блока акселерометров позволяет повысить точность оценивания калибруемых параметров, а также ослабить требования к испытательному стенду и применяемым технологическим приспособлениям. Тогда задача калибровки блока акселерометров состоит в получении оценок 9 калибруемых параметров, переведенных в Таблице 2.

Таблица 2

калибруемые параметры модели БА									
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Δ_x	Δ_y	Δ_z	δk_x	δk_y	δk_z	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}

В третьей главе проведён синтез оптимальных программ калибровки блока акселерометров инерциальных навигационных систем с обеспечением условий инвариантности относительно ошибок испытательного стенда и ошибок выставки блока акселерометров на стенде по критерию максимального подавления влияния измерительного шума на результаты калибровки составляющих инструментальных погрешностей акселерометров и критерию снижения трудоёмкости процесса калибровки блока акселерометров, исследованы точностные характеристики синтезированных программ калибровки блока акселерометров и разработан прикладной алгоритм калибровки блока акселерометров ИНС.

Из уравнения (4) нетрудно получить уравнения процесса калибровки блока акселерометров в рассматриваемом случае для вращений вокруг оси OZ:

$$\partial \bar{J}_L^{x-y} = H_A^{x-y} \cdot \bar{X}_A^{12} + \omega_{12}, \quad (5)$$

где: $H_A^{x-y} = [\sin \alpha_1, \cos \alpha_1, \sin 2\alpha_1, \cos 2\alpha_1]$ – матрица наблюдений в задаче калибровки вектора $\bar{X}_A^{12}$; $\partial J_L^{x-y} = \partial J_x \sin \alpha_1 + \partial J_y \cos \alpha_1$ – измерение в задаче калибровки вектора $\bar{X}_A^{12}$; $\bar{X}_A^{12} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$ – вектор калибруемых параметров блока акселерометров по измерениям ∂J_L^{x-y} ; $X_1 = \frac{1}{2}(\delta k_x + \delta k_y)$, $X_2 = \Delta_x$, $X_3 = \Delta_y$, $X_4 = \frac{1}{2}\gamma_{12}$, $X_5 = \frac{1}{2}(\delta k_x - \delta k_y)$ – составляющие векторы $\bar{X}_A^{12}$, образующие соответствующие линейным комбинациям компонент вектора калибруемых параметров блока акселерометров $\bar{X}_A$; $\partial J_L^{x-y} = \partial J_x \sin \alpha_1 + \partial J_y \cos \alpha_1$ – измерение в задаче калибровки вектора $\bar{X}_A^{12}$; ω_{12} – измерительный шум в задаче калибровки вектора $\bar{X}_A^{12}$.

Критерий максимального подавления влияния измерительного шума на результаты калибровки составляющих вектора $\bar{X}_A^{12}$ в данном случае достигается при выполнении условия:

$$\alpha_i(i) = \alpha_i(1) + \frac{2\pi}{N}(i-1), \quad (6)$$

где $i=1,2,3,\dots$ – номер измерительного положения в программе калибровки, $\alpha_i(i)$ – значения угла α_i в i -ом измерительном положении, $N \geq 5$ – число измерительных положений вектора $\bar{X}_A^{12}$. Тогда минимальное число измерительных положений $N=5$ в программе калибровки будет соответствовать критерию минимизацию трудоёмкости процесса калибровки.

Уравнения процесса калибровки блока акселерометров в случае, когда измерительные положения задаются вращением вокруг оси акселерометра OX (Рис. 4) с учётом результатов калибровки вектора $\bar{X}_A^{12}$ на основании уравнения (5). Используя уравнение (4), можно записать так:

$$\partial \bar{J}_{L3}^{y-z} = H_{A3}^{y-z} \cdot \bar{X}_A^{23} + \omega_{23} \quad (7)$$

Здесь: $\bar{X}_A^{23} = [\Delta_z, \gamma_{23}, \delta k_z]^T$ – вектор калибруемых параметров блока акселерометров по измерениям ∂J_{L3}^{y-z} ; $H_{A3}^{y-z} = [-\sin \alpha_2, \sin \alpha_2 \cos \alpha_2, \sin^2 \alpha_2]$ – матрица наблюдений в задаче калибровки вектора $\bar{X}_A^{23}$; ω_{23} – измерительный шум.

По первым восьми положениям в программах калибровки блока акселерометров можно откалибровать все составляющие вектора $\bar{X}_A$, кроме

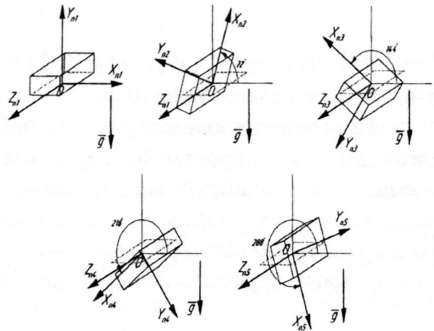


Рис.3. Положения БА относительно вектора УСТ ($\alpha_1(1) = 0$, $\alpha_1(2) = 72^\circ$, $\alpha_1(3) = 144^\circ$, $\alpha_1(4) = 216^\circ$, $\alpha_1(5) = 288^\circ$)

γ_{13} . Очевидно, что для калибровки γ_{13} достаточно использовать одно измерительное положение (Рис. 4), задаваемое углами α_1 и α_2 , так:

$$\alpha_1 = 45^\circ + 90^\circ \cdot n, \quad (n = \text{любое из } 0, 1, 2, 3); \quad \alpha_2 = 90^\circ$$

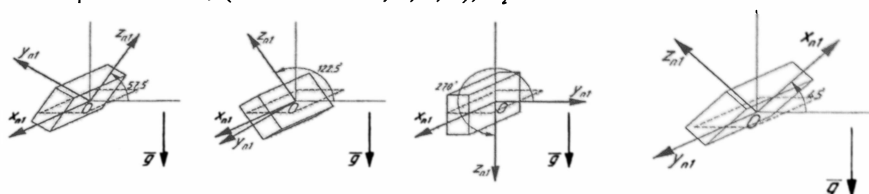


Рис. 4. Положение БА относительно УСТ ($\alpha_2(1) = 57,5^\circ$, $\alpha_2(2) = 122,5^\circ$, $\alpha_2(3) = 270^\circ$) и ($\alpha_1 = 45^\circ + 90^\circ \cdot n$ ($n = 0, 1, 2, 3$), $\alpha_2 = 90^\circ$)

Получено семь оптимальных программ калибровки блока акселерометров, состоящих из измерительных положений, обладающих различной степенью избыточности для оценки калибруемых параметров и трудоемкостью процесса калибровки блока акселерометров. В Таблице 3 указаны числа измерительных положений и значения математических параметров (углов α_1 и α_2), определяющих данные измерительные положения в каждой из полученных программ калибровки.

Таблица 3.

Измерительные положения программы

№ ИП	I		II		III		IV
	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1
1	$\alpha_1(1)$	0	$\alpha_1(1)$	0	$\alpha_1(1)$	0	$\alpha_1(1)$
2	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 72^\circ$
3	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 144^\circ$
4	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 216^\circ$
5	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 288^\circ$
6	0	$\alpha_2(6)$	0	$\alpha_2(6) + 72^\circ$	0	$57,5^\circ$	0
7	0	$\alpha_2(6) + 72^\circ$	0	$\alpha_2(6) + 144^\circ$	0	$122,5^\circ$	0
8	0	$\alpha_2(6) + 144^\circ$	0	$\alpha_2(6) + 216^\circ$	0	270°	0
9	0	$\alpha_2(6) + 216^\circ$	0	$\alpha_2(6) + 288^\circ$	$\alpha_1(1)$	90°	$57,5^\circ$
10	0	$\alpha_2(6) + 288^\circ$	$\alpha_1(1)$	90°	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	90°	$122,5^\circ$
11	$\alpha_1(1)$	90°	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	90°	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	90°	270°
12	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	90°	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	90°	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	90°	45°
13	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	90°	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	90°	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	90°	-
14	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	90°	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	90°	-	-	-
15	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	90°	-	-	-	-	-

Таблица 3 (продолжение)

№ ИП	IV	V		VI		VII	
	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2
1	0	$\alpha_1(1)$	0	$\alpha_1(1)$	0	$\alpha_1(1)$	0
2	0	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 72^\circ$	0
3	0	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 144^\circ$	0
4	0	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 216^\circ$	0
5	0	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	0	$\alpha_1(1) + 288^\circ$	0
6	57.5°	0	57.5°	0	57.5°	0	57.5°
7	122.5°	0	122.5°	0	122.5°	0	122.5°
8	270°	0	270°	0	270°	0	270°
9	90°	57.5°	90°	45°	90°	45°	90°
10	90°	122.5°	90°	$45^\circ + 180^\circ$	90°	-	-
11	90°	270°	90°	-	-	-	-
12	90°	-	-	-	-	-	-

Полученные оптимальные программы калибровки БА имеют различную степень избыточности в зависимости от различной степени с учётом информационных свойств матриц измерений и обладают свойством инвариантности относительно ошибок выставки БА на стенде и инструментальных ошибок стенда.

Исследования точностных характеристик синтезированных программ калибровки проводились путем вычисления отношений дисперсии ошибок оценки параметров к дисперсии измерительного шума для каждой из программ. Проведен сравнительный анализ свойств синтезированных оптимальных программ калибровки. Результаты данных исследований представлены соответствующей гистограммой на Рис. 5, где показаны отношения дисперсий ошибок оценки калибруемых параметров для каждой из программ калибровки.

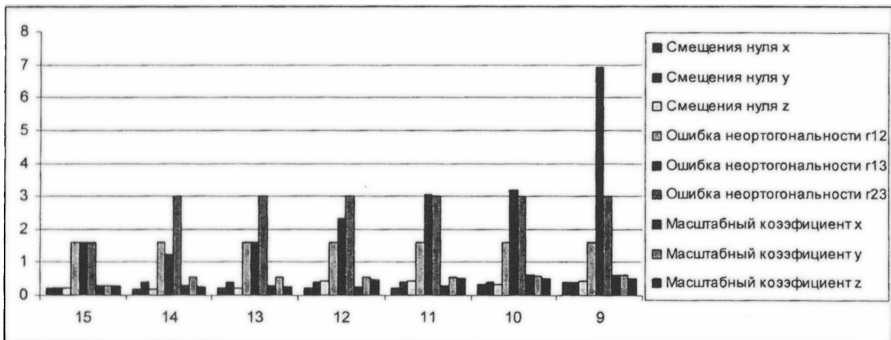


Рис. 5. Гистограмма отношений дисперсий ошибок оценки параметров к дисперсии измерительного шума для семи программ калибровки БА

Наилучшими точностными характеристиками обладает программа, состоящая из 15 измерительных положений, а программа калибровки БА № 6 из 10 измерительных положений имеет высокую степень избыточности. Синтезированные оптимальные программы калибровки № 2, 3, 5 и 7 из 14, 13, 12, 11 и 9 измерительных положений имеют меньшую точность калибровки. Можно считать все приведенные программы калибровки наиболее приемлемыми.

Таблица 4.

Сравнительный анализ точности калибровки

Программа калибровки БА	калибруемые параметры								
	Δ_x	Δ_y	Δ_z	γ_{12}	γ_{13}	γ_{23}	δk_x	δk_y	δk_z
№ 1 (15 ИП)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
№ 2 (14 ИП)	-	~22%	-	-	-	-	-	20%	-
№ 3 (13 ИП)	-	~41%	-	-	-	~43%	-	-	-
№ 4 (12 ИП)	-	~43%	~41%	-	~21%	~43%	-	~39%	~30%
№ 5 (11 ИП)	-	~40%	~40%	-	-	~40%	-	~40%	-
№ 6 (10 ИП)	~41%	~42%	~30%	-	~42%	~41%	~40%	~43%	~40%
№ 7 (9 ИП)	~42%	~47%	~40%	-	- 103%	~40%	~40%	~46%	~40%

Проведен сравнительный анализ по точности калибровки (Таблица 4). Программа калибровки № 1 из 15 измерительных положений является симметричной программой. Наиболее приемлемой программой калибровки является программа калибровки № 6 из 10 измерительных положений, так как в этом случае средняя точность калибровки параметров снижается равномерно на 40 % у всех калибруемых параметров. При этом угол перекоса γ_{12} не теряет точности калибровки, но уменьшает трудоёмкость калибровки блока акселерометров на 50 % (Таблица 5).

Таблица 5.

Сравнительный анализ по трудоёмкости калибровки

номер программы	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
измерительные положения	15	14	13	12	11	10	9
	-	7%	15%	25%	36%	50%	66%

Если плоскости расположены равно между двумя акселерометрами, используя угол перекося γ_{12} , получаем в общем эффекте среднюю точность калибровки в программе № 6 из 10 измерительных положений 30 % (практически не теряем точности) и уменьшаем трудоёмкость. Дальнейшее снижение числа измерительных положений приводит к росту ошибки оценки γ_{11} в два раза, поэтому эффективно не переходить на программу калибровки № 7 из 9 измерительных положений.

Для решения задачи синтеза в диссертации разработан прикладной алгоритм калибровки блока акселерометров ИНС (Рис. 6). Разработанный алгоритм калибровки блока акселерометров реализуется в пакете Matlab. Расчетные формулы позволяют реализовать в другом математическом пакете. Для алгоритма калибровки применен метод наименьших квадратов. Применение метода наименьших квадратов не требует привлечения статистической информации об ошибках блока акселерометров. Минимизируя квадратичный критерий $z(X_L) = \|H_L \cdot X_L - z\| = \min_{X_L}$ получим выражения следующего вида:

$$\hat{X}_L = (H_L^T H_L)^{-1} H_L^T \bar{z}, \quad (5)$$

где $z = [\partial J_L(1) \ \partial J_L(2) \ \dots \ \partial J_L(i)]^T$, $\partial J_L(i) = \eta_x(i) \partial J_x(i) + \eta_y(i) \partial J_y(i) + \eta_z(i) \partial J_z(i)$,
 $\partial J_x(i) = J_x(i) - J_{xm}(i)$, $\partial J_y(i) = J_y(i) - J_{ym}(i)$, $\partial J_z(i) = J_z(i) - J_{zm}(i)$.

По соответствию алгоритма калибровки блока акселерометров ИНС вычислим оценки для программы калибровки измерительных положений стенда по формуле :

$$\hat{\bar{X}}_{415} = (H_{15 \times 9}^T \cdot H_{15 \times 9})^{-1} H_{15 \times 9}^T \bar{z}_{15}. \quad (6)$$



Рис.6. Блок-схема алгоритма калибровки

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования инструментальных погрешностей разработанной методики калибровки блока акселерометров и анализ результатов экспериментальной проверки методики калибровки блока акселерометров. Для проведения экспериментальных исследований была разработана установка в лаборатории на кафедре ИУ-2 «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации». Оборудование подготовлено в работе под руководством доцента кафедры, кандидата технических наук А.В. Польшкова. Калибровка блока

акселерометров производится на поворотном устройстве с применением в качестве метрологического эталона ускорения силы тяжести в базовой системе координат, связанной с испытываемым прибором (Рис. 7). В качестве поворотного устройства для практической реализации стенда была выбрана одноосная оптическая делительная головка (ОДГ – 10 № 64104, ГОСТ 9016-59). Предельная погрешность измерения угла у данной оптической делительной головки составляет $10''$. В качестве акселерометров для калибровки на ОДГ выбран акселерометр типа «Si – flex» КСА – 100 (Рис. 8), разработанный кафедрой ИУ-2 по контракту с фирмой Нюор Чин (Республика Корея). Руководитель группы разработок – доктор технических наук, профессор С.Ф. Коновалов.

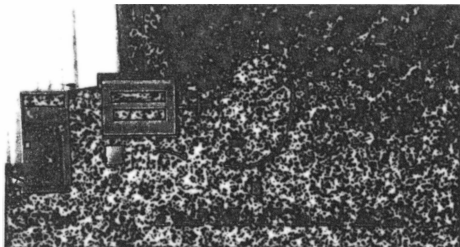


Рис. 7. Внешний вид стенда калибровки пары акселерометров

Рис. 8. Акселерометр «Si – flex»

В программу экспериментальных исследований разработанной методики калибровки блока акселерометров были включены две следующие основные задачи: экспериментальное подтверждение независимости точности калибровки блока акселерометров от значений угла α_0 в программе калибровки №1 с оценкой точностных характеристик; экспериментальное подтверждение выполнения условий инвариантности относительно инструментальных погрешностей стенда в разработанной методике калибровки блока акселерометров с оценкой точностных характеристик.

Экспериментальные исследования по первой задаче проводились при семи различных значениях углов $\alpha_0 = 0; 15; 30; 45; 60; 75; 90$ градусов и в двух положениях акселерометров относительно узлов крепления на базовой поверхности кронштейна, развернутых относительно друг друга на 120 градусов. Экспериментальные исследования по второй задаче проводились при тех же условиях, как и в первой, с дополнительным заданием ОДГ ошибок позиционирования блока акселерометров на 30 угловых минут и в пределах 1 градуса.

Результаты экспериментального исследования показывают одинаковые точности оценки калибруемых параметров акселерометров при выборе значения угла (α) независимо от начального угла (α_0). При постоянном сдвиге с ошибкой $30'$ даются такие же данные, как в случае независимости от начального угла (α_0), что соответствует инвариантности методики калибровки акселерометров. На Рис. 9. показаны оценки калибруемых параметров пары акселерометров при различных условиях.

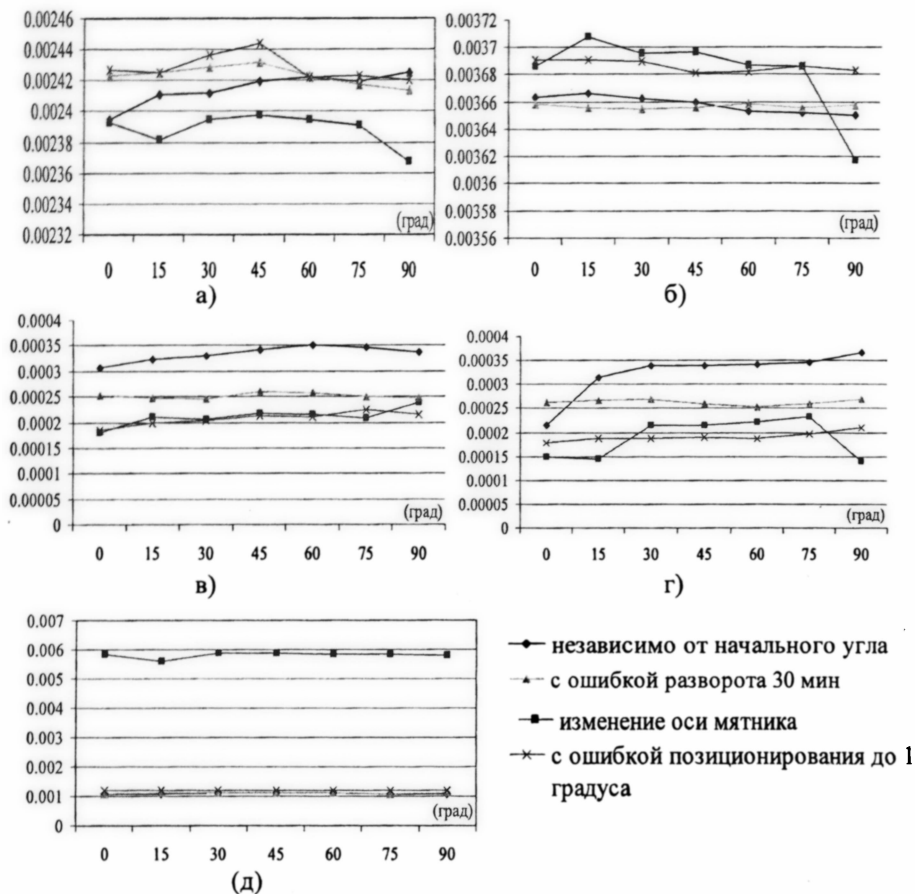


Рис.9. Оценки в зависимости от угла $\alpha_0 = 0; 15; 30; 45; 60; 75; 90$ градусов

а) смещения нулей акселерометра по каналу X; смещения нулей акселерометра по каналу Y; в) отклонения масштабных коэффициентов акселерометра по каналу X; отклонения масштабных коэффициентов акселерометра по каналу Y; д) угол перекоса входных осей между акселерометрами X и Y

Анализ представленных экспериментальных данных (Рис.9) показывает высокую стабильность всех оценок калибруемых параметров пары акселерометров по разработанной методике в различных условиях проведения калибровки акселерометров на оптической делительной головке.

В заключение приведены основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

В диссертации разработана методика калибровки блока акселерометров ИНС с использованием инвариантности относительно малых ошибок выставки инструментальных погрешностей испытательного стенда, обеспечивающей

повышение точности и достоверности оценки составляющих инструментальных погрешностей акселерометров. Применение разработанной методики позволяет значительно ослабить требование к испытательному оборудованию. Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана математическая модель инструментальных погрешностей блока акселерометров инерциальных навигационных систем на испытательном стенде.
2. Исследованы условия инвариантности для калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров инерциальных навигационных систем относительно ошибок выставки блока акселерометров на стенде и инструментальных погрешностей стенда.
3. Получено 7 оптимальных (субоптимальных) программ калибровки, обладающих различной степенью избыточности в зависимости от степени учета информационных свойств матриц измерений, благодаря применению критерия максимального подавления влияния измерительного шума на результаты калибровки составляющих инструментальных погрешностей блока акселерометров ИНС.
4. Синтезированы оптимальные программы калибровки блока акселерометров, обладающие свойствами инвариантности относительно ошибок выставки и инструментальных погрешностей стенда.
5. Выделена наиболее полно удовлетворяющая предъявленным требованиям программа калибровки, состоящая из 10 измерительных положений.
6. Разработан прикладной алгоритм калибровки блока акселерометров ИНС.
7. Проведено экспериментальное подтверждение разработанной методики калибровки блока акселерометров инерциальных навигационных систем.

Тема и содержание диссертации отражены в следующих научных работах.

1. Егоров Ю.Г., Мьинт Хтун Наинг. Инвариантность уравнений процесса калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы относительно ошибок испытательного стенда // ТРУДЫ ФГУП «НПЦАП» системы и приборы управления. 2013. № 2. С. 33-37. (0,12 п.л/0,19 п.л)
2. Егоров Ю.Г., Мьинт Хтун Наинг. Синтез модели процесса калибровки триады акселерометров инерциальной навигационной системы // ТРУДЫ ФГУП «НПЦАП» системы и приборы управления. 2012. № 2. С. 15-21. (0,12 п.л/0,25 п.л)
3. Егоров Ю.Г., Мьинт Хтун Наинг. Синтез модели процесса калибровки триады акселерометров инерциальной навигационной системы. Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVII Академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2014г./ Под общей редакцией А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке

научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2013. С. 629-630.

4. Егоров Ю.Г., Мьинт Хтун Наинг. Синтез программы калибровки блока акселерометров бесплатформенной инерциальной навигационной системы // ТРУДЫ ФГУП «НППЦА» системы и приборы управления. 2014. №4. 15 с. (0,3 п.л/0,6 п.л)
5. Мьинт Хтун Наинг. Адаптивная идентификация блока акселерометров инерциальной навигационной системы. XIII международный симпозиум «Уникальные феномены и универсальные ценности культуры». Сборник научных статей / Под общей ред. И. А. Архарова и И. Е. Моториной – М.:МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. С. 231-233.
6. Мьинт Хтун Наинг. Алгоритм калибровки блока акселерометров БИНС, инвариантный к инструментальным погрешностям испытательного стенда. Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVIII Академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2014г. / Под общей редакцией А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2014. С. 594.
7. Мьинт Хтун Наинг. Калибровка триады акселерометров инерциальной навигационной системы на стенде // Наукоемкие технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе : материалы Региональной научно-технической конференции, 22 – 25 апреля 2014 г. Т.1. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. С. 180-192.
8. Мьинт Хтун Наинг. Метод калибровки блока акселерометров инерциальной навигационной системы на испытательном стенде // Наука и Образование: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 1. 15 с. URL: technomag.edu.ru/doc/691573.html (дата обращения 15.03.2014)
9. Мьинт Хтун Наинг. Модель инструментальных погрешностей триады акселерометров. Актуальные проблемы информатизации в науке, образовании и экономике – 2011. 4-я Всероссийская межвузовская научно-практическая конференция. М. МИЭТ, 2011. С. 95.
10. Мьинт Хтун Наинг. Модель ошибок блока акселерометров.// Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVI Академических чтений по космонавтике. Москва, январь 2012г./ Под общей редакцией А.К. Медведевой. М.: Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2012. С. 568–569.
11. Мьинт Хтун Наинг. Модель погрешностей блока триады акселерометров на испытательном стенде инерциальной навигационной системы. «Россия в XXI веке: проблемы, тенденции, перспективы» // Материалы XIV международного симпозиума «Уникальные феномены и универсальные ценности культуры», сборник научных статей / Под общей ред. И.А. Архарова и И.Е. Моториной – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 268–270.