

А. М. БОРОНАХИН, П. А. ИВАНОВ, Е. Д. БОХМАН, Ю. В. ФИЛАТОВ, И. Л. СУРОВ

НОВЫЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведены результаты и некоторые особенности выполненных кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию средств испытаний инерциальных систем и их чувствительных элементов. Представлена «линейка» испытательных стендов, начиная от одноосного поворотного стола и заканчивая высокоточным трехосным стендом, оснащенным термокамерой. Для стенда двухосного автоматизированного СДА-15 разработана программа и методика первичной и периодической аттестации его технических характеристик. Метрологическое обеспечение установки осуществлено с помощью как традиционных схем контроля ее параметров, так и специально разработанного бесконтактного способа оценки отклонения от перпендикулярности двух осей вращения.

Введение

Перспективы развития навигационных комплексов связаны с созданием инерциальных систем, обладающих малыми массой, габаритными размерами, энергопотреблением и себестоимостью, а также обеспечивающих характеристики инерциальных навигационных систем (ИНС) среднего класса точности благодаря комплексированию со спутниковыми системами навигации, магнитными компасами, датчиками пройденной дистанции и т.д. В качестве элементной базы могут рассматриваться миниатюрные инерциальные датчики, в том числе интенсивно развивающиеся микромеханические гироскопы (ММГ) и акселерометры (ММА), технические характеристики которых уже достигли промышленного класса точности и постепенно приближаются к тактическому (табл. 1) [13].

Проектирование ИНС предполагает исследование инструментальных погрешностей трехосного блока ее чувствительных элементов. Анализ используемого на сегодняшний день испытательного оборудования выявил в нем ряд существенных недостатков. Во-первых, большинство стендов, обладая высокими

Боронахин Александр Михайлович. Кандидат технических наук, доцент, зам. зав. каф. ЛИНС по научной работе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ). Член молодежной секции Академии навигации и управления движением.

Иванов Павел Алексеевич. Аспирант, инженер СПбГЭТУ.

Бохман Евгений Давидович. Инженер СПбГЭТУ, директор ООО «ИНЕРТЕХ» (С.-Петербург).

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, зав. каф. ЛИНС, декан ФИБС СПбГЭТУ. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Суров Илья Леонидович. Магистрант СПбГЭТУ.

Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

точностями, имеют большие массу и габариты и соответственно стоимость, что делает нерентабельным их использование в процессе проектирования малогабаритных систем. Во-вторых, функциональность стендов определена рекомендациями международной организации IEEE по калибровке инерциальных датчиков, предполагающих либо задание серии фиксированных угловых положений (далее – позиционирование), либо вращение с постоянной за оборот угловой скоростью [1, 2]. Однако более эффективным с точки зрения качества калибровки является реализация режимов движения, свойственных объекту, для которого разрабатывается ИНС [12]. При этом искомые параметры определяются в интегрированном режиме работы ИНС, предполагающем коррекцию ее показаний по данным об угловой ориентации, задаваемой стендом и определяемой входящими в его состав высокоточными датчиками угла.

Т а б л и ц а 1

Требования к точностным характеристикам гироскопов и акселерометров

Класс точности датчика	Сдвиг нуля ММА, mg	Сдвиг нуля ММГ, $^{\circ}/\sqrt{ч}$	Отклонение от перпендикулярности осей в триаде, град		Погрешность масштабного коэффициента, %	
			ММА	ММГ	ММА	ММГ
Автомобильный	125	5	0,57	3,6	10	6
Промышленный	3	3	0,057	0,36	0,1	0,05
Тактический	0,3	0,07	0,0057	0,036	0,035	0,01
Навигационный	0,025	0,002	0,0029	0,0018	0,01	0,001

Кроме того, исследование погрешностей чувствительных элементов, входящих в состав ИНС, должно быть реализовано с учетом инструментальных погрешностей средства испытаний. Как правило, поставляемое на российский рынок испытательное оборудование является зарубежным и не входит в реестр средств измерений РФ. То есть, нет возможности проведения первичной и периодической аттестации таких установок на предмет исследования их инструментальных погрешностей и подтверждения технических характеристик.

Для устранения указанных недостатков необходима разработка отечественного испытательного оборудования, отличающегося невысокой стоимостью и малыми габаритами. Проанализировав основные этапы производства ИНС, напрашивается следующая номенклатура устройств:

- 1) одноосные поворотные столы – для селекционного отбора одноосных инерциальных датчиков;
- 2) двухосные поворотные столы – для оценки качества сборки трехосных инерциальных измерительных модулей (ИИМ);
- 3) трехосные поворотные столы – для контроля (и настройки) алгоритмов навигации и ориентации в условиях имитации движений объекта, для которого разрабатывается ИНС.

Малогабаритное испытательное оборудование

Научный коллектив кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) СПбГЭТУ «ЛЭТИ» начиная с 2005 года, активно выполняет работы по созданию миниатюрных испытательных стендов для осуществления задач калибровки ММГ и ММА.

На первом этапе был спроектирован и изготовлен стенд испытательный одноосный СИО-15 (рис. 1), который обеспечивает вращение и угловое по-



Рис. 1. Стенд испытательный одноосный СИО-15

зиционирование в двух взаимно ортогональных плоскостях (с помощью специального углового кронштейна).

Основными целями, которые ставились перед разработчиками, являлись обеспечение автоматизации процесса испытаний и минимизация ручных операций, обычных при использовании различных делительных головок и поворотных столов с ручным приводом.

Управление стендом СИО-15 осуществляется с компьютера, на котором также реализована индикация текущих значений скорости вращения и углового положения оси.

Технические характеристики СИО-15 приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Технические характеристики СИО-15

1. Диапазон углов разворота, град	Не ограничен
2. Погрешность позиционирования, угл. с.	15
3. Диапазон скоростей вращения, град/с	± 1500
4. Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот, %	0,01
5. Диаметр планшайбы, мм	135
6. Масса испытуемого объекта, кг	Не более 2

Так как изготовленная партия из нескольких экземпляров СИО-15 предназначалась исключительно для использования в учебном процессе СПбГЭТУ «ЛЭТИ», мероприятия по включению данной установки в реестр средств измерений РФ не проводились.



Рис. 2. Стенд двухосный автоматизированный СДА-15

Следует отметить, что современные требования к калибровке одноосного датчика предполагают оценку пространственной ориентации его оси чувствительности относительно посадочной плоскости, а также уровня так называемых перекрестных связей. Фактически ММГ и ММА рассматриваются как трехосные инерциальные измерительные модули (ИИМ), испытания которых с использованием одноосных стендов предполагают их переустановку, что вносит дополнительные погрешности и увеличивает трудозатраты.

Поэтому в 2009 году был разработан стенд двухосный автоматизированный СДА-15 (рис. 2). Стоимость этого стенда на порядок меньше стоимости аналогичных зарубежных систем (Acutronic, Actidyn, iMar, Ideal Aerosmith и др. [3–7]), при этом его технические характеристики (табл. 3) сопоставимы с соответствующими значениями характеристик зарубежных аналогов.

Принципиальным отличием разработки от своих аналогов является:

- наличие программного обеспечения, адаптированного к нуждам разработчика ИНС;
- реализация режимов «сценария», (т.е. задания последовательности команд по обеим осям стенда) что позволяет максимально автоматизировать процесс калибровки ИИМ;

- выдача потребителю в режиме реального времени текущего значения скоростей вращения и углового положения по обеим осям (плата синхронизации данных с протоколами передачи данных RS-232/422/485).

Известно, что на показания ММГ и ММА существенное влияние оказывает изменение абсолютной температуры, приводящее к нарушениям резонансной настройки и к возникновению дополнительных моментов инерционных, упругих и кориолисовых сил инерции относительно измерительной оси (оси чувствительности) датчика [8].

Т а б л и ц а 3

Технические характеристики СДА-15

1. Диапазон углов разворота по обеим осям, град	Не ограничен
2. Погрешность позиционирования по обеим осям, угл. с.	15
3. Диапазон скоростей вращения по обеим осям, град/с	± 300
4. Отклонение от перпендикулярности осей вращения, угл. мин.	Не более 1
5. Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот, %	0,005
6. Диаметр планшайбы, мм	200
7. Масса испытуемого объекта, кг	Не более 2

Для получения математических описаний зависимостей выходных характеристик чувствительных элементов ИИМ от температурных процессов в 2010 году была выполнена модификация стенда СДА-15 – стенд двухосный автоматизированный с термокамерой СДА-2Т (рис. 3). Специально для этого проекта была спроектирована и разработана термоэлектрическая камера на элементах Пельтье.

Технические характеристики СДА-2Т приведены в табл. 4.

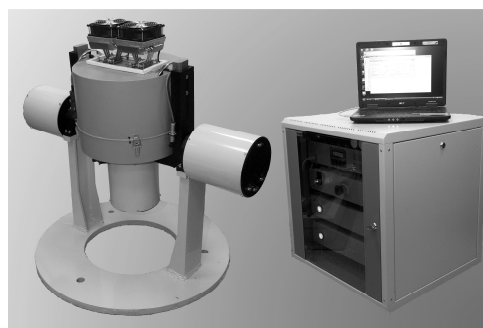


Рис. 3. Стенд СДА-2Т двухосный автоматизированный с термокамерой

Т а б л и ц а 4

Технические характеристики СДА-2Т

1. Диапазон углов разворота по обеим осям, град	Не ограничен
2. Погрешность позиционирования по обеим осям, угл. с.	2,5
3. Диапазон скоростей вращения по обеим осям, град/с	± 360
4. Отклонение от перпендикулярности осей вращения, угл. сек.	Не более 30
5. Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот, %	0,005
6. Погрешность задания угловой скорости вращения, %	0,005
7. Диапазон задаваемых температур, °С	-20...+40
8. Стабильность поддержания заданной температуры, °С	± 1
9. Диаметр планшайбы, мм	200
10. Масса испытуемого объекта, кг	Не более 5

В 2011 г. будут закончены мероприятия [9] по их включению в реестр средств измерений РФ.

Анализ современного состояния и тенденций развития инерциальных испытательных систем, а также выявление ряда принципиальных недостатков в алгоритмах калибровки микромеханических чувствительных элементов и моду-

лей на их основе, определили цели и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Перспективным направлением развития методов испытаний ИИМ является привлечение технологий интегрированных систем ориентации и навигации. В данном случае речь идет о том, что испытательный стенд должен имитировать движения объекта, а параметры оцениваются с помощью методов оптимальной фильтрации. Обработка показаний высокоточных датчиков углов стенда позволяет сформировать как угловые, так и скоростные измерения.

В результате в 2011 году, была спроектирована структурная схема установки и изготовлен опытный образец стенда трехосного автоматизированного с термокамерой СТА-2Т (рис. 4), технические характеристики которого приведены в табл. 5.

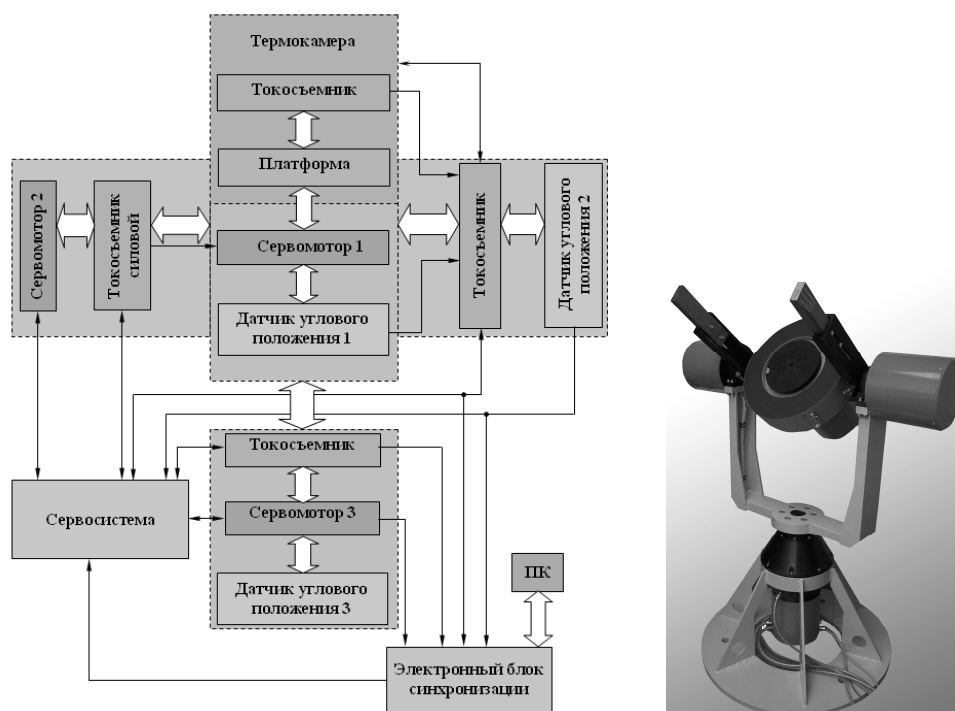


Рис. 4. Структурная схема и внешний вид опытного образца изделия СТА-2Т

Т а б л и ц а 5

Технические характеристики СТА-2Т

1. Диапазон углов разворота по всем осям, град	Не ограничен
2. Погрешность позиционирования по всем осям, угл. с.	2,5
3. Диапазон скоростей вращения по малой и средней осям, град/с	± 360
4. Диапазон скоростей вращения по большой оси, град/с	± 120
5. Отклонение от перпендикулярности осей вращения, угл. с	Не более 30
6. Нестабильность скорости вращения при осреднении за один оборот, %	0,005
7. Диапазон задаваемых температур, ° С	-20...+40
8. Стабильность поддержания заданной температуры, ° С	± 1
9. Диаметр планшайбы, мм	200
10. Масса испытуемого объекта, кг	Не более 5

Методика оценки соответствия техническим характеристикам

Изделие СДА-15 имеет контролируемые технические характеристики, которые представлены в табл. 3 (пп. 1, 4-6). Рассмотрим основные положения предлагаемой методики.

Погрешность позиционирования по обеим осям станда оценивается с помощью известного метода определения точности углов поворота [10]. Средствами измерения в данном случае являются теодолит автоколлимационный ЗТ2КА и правильная восьмигранная призма нулевого класса точности.

Для проведения измерений призма с помощью оправки (рис. 5) устанавливается на одной из осей станда и юстируется помощью теодолита следующим образом: выставляют зрительную трубу теодолита так, чтобы в автоколлимационном режиме работы прибора визуально наблюдать отраженное от первой грани призмы изображение (рис. 6). Далее, последовательно разворачивая ось станда на 45° , убеждаются в том, что отраженные изображения от всех граней призмы находятся в пределах не более ± 1 угл. мин. (что достигается юстировкой положения призмы относительно ее оправки)

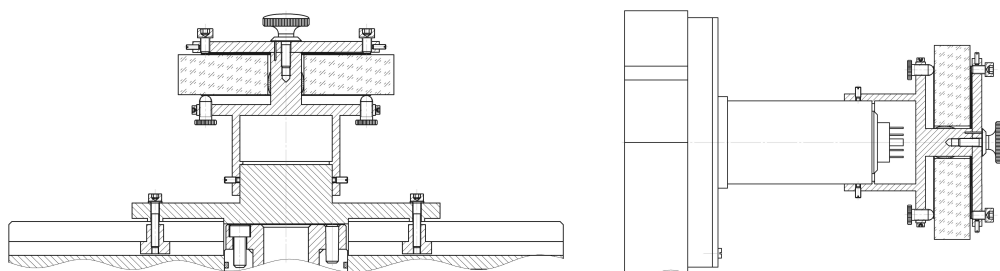


Рис. 5. Установка призмы на ось поворота (слева) и ось наклона (справа) СДА-1

После серии измерений от всех граней призмы вычисляется предельная погрешность позиционирования по обеим осям станда, которая определяется с помощью статистических методов обработки и представляет собой наибольшую разность фактического (измеряемого теодолитом) и номинального (межгранного угла по паспорту призмы) углов разворота. Погрешность измерений определяется инструментальными погрешностями средств измерений, и не превышает $12,31''$.

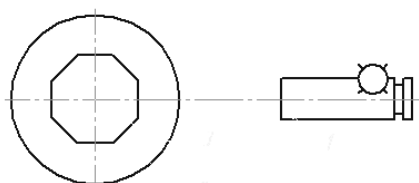


Рис. 6. Схема измерения погрешности позиционирования

Погрешность задания угловой скорости и ее нестабильность в среднем за оборот по обеим осям станда оценивается по результатам, полученным с использованием частотомера, работающего в режиме измерения периода.

а) Для оценки погрешности задания угловой скорости по обеим осям станда на вход частотомера подается сигнал нулевой метки с датчика угла соответствующей оси. При этом отклонение измеренного с помощью частотомера значения угловой скорости от заданного вычисляется как $\Delta\Omega_i^{k*} = \Omega^k - \Omega_i^{k*}$, где Ω^k – заданное значение угловой скорости, град/с; $\Omega_i^{k*} = \frac{360}{T_i^k}$ – измеренное значение угловой скорости (T_i^k – результат измерения периода вращения, с; i – номер измерения), град/с.

После серии измерений с помощью частотомера фактических угловых скоростей в разных направлениях оценивается погрешность задания угловой скорости для обеих осей стенда в процентном соотношении.

б) Нестабильность угловой скорости в среднем за оборот оценивается на основе данных, полученных при оценке погрешности ее задания. Выбираются максимальный $\Omega_{\max}^{k*}$ и минимальный $\Omega_{\min}^{k*}$ результаты измерений угловой скорости в серии при вращении против часовой стрелки и заданном значении угловой скорости. После чего вычисляется предел относительной нестабильности угловой скорости при вращении против часовой стрелки и заданном значении угловой скорости, %

$$\delta_{\Omega}^k(-) = \frac{|\Omega_{\max}^{k*} - \Omega_{\min}^{k*}|}{2\Omega^k} \cdot 100\%.$$

Аналогично рассчитывается значение предела относительной нестабильности для вращения по часовой стрелке $\delta_{\Omega}^k(+)$.

Таким образом, нестабильность угловой скорости в среднем за оборот представляет собой наибольшее значение между пределами относительной нестабильности угловой скорости при вращении по часовой стрелке и против нее:

$$\delta_{\Omega}^k = \max[\delta_{\Omega}^k(+), \delta_{\Omega}^k(-)].$$

Погрешность измерений определяется техническими характеристиками используемого частотомера (в режиме времени (периода)) и составляет порядка $(2,5 \cdot 10^{-5})$ % от измеряемой величины.

Известные схемы и способы оценки отклонения от перпендикулярности двух осей вращения [10] имеют ряд принципиальных ограничений, связанных прежде всего с особенностями применяемых контактных средств измерений и контроля, таких, как рамные уровни и контрольные оправки, требующие обеспечения одновременной физической доступности к элементам установки, что не всегда возможно. Таким образом, необходимо разработать новый метод оценки отклонения от перпендикулярности, не требующий одновременной физической доступности к элементам стенда и способный обеспечивать точность определения искомого параметра на достаточном уровне.

Предлагаемый способ (рис. 7) и предполагает использование призмы и трех автоколлимационных теодолитов.

Исходя из того, что угловое поле зрительной трубы теодолита ЗТ2КА составляет $1^{\circ}35'$ и наименьшее расстояние визирования без дополнительной насадки – 1500 мм, следует, что теодолиты выставляют на штативах с точностью по высоте не менее ± 20 мм.

После выставки призмы в горизонт разворачивают ось поворота стенда на 90° вокруг оси наклона (рис. 7, а) и снимают «кругом слева» первый начальный отсчет $\alpha_{11}^{кл}$ теодолитом Т1 от первой грани восьмигранной призмы. Соответствующим образом снимают показания «кругом справа» $\alpha_{11}^{кп}$ и вычисляют первый начальный отсчет теодолита Т1 по двум измерениям:

$$\alpha_{11} = \frac{\alpha_{11}^{кл} + (\alpha_{11}^{кп} - 180^{\circ})}{2}.$$

После разворота призмы на 180° вокруг обеих осей стенда (рис. 7, б) ее первая грань оказывается в поле зрения теодолита Т2, которым снимают соответствующие горизонтальные отсчеты $\alpha_{21}^{кл}$ и $\alpha_{21}^{кп}$ и вычисляют α_{21} :

$$\alpha_{21} = \frac{\alpha_{21}^{кл} + (\alpha_{21}^{кп} - 180^\circ)}{2}.$$

Теодолит Т3 выставляют так, чтобы обеспечить оптическую связь между всеми теодолитами, иначе говоря, подсвеченная сетка нитей теодолита Т3 должна быть наблюдаема в окуляры теодолитов Т1 и Т2 при повороте первого на угол α_3 (см. рис. 7).

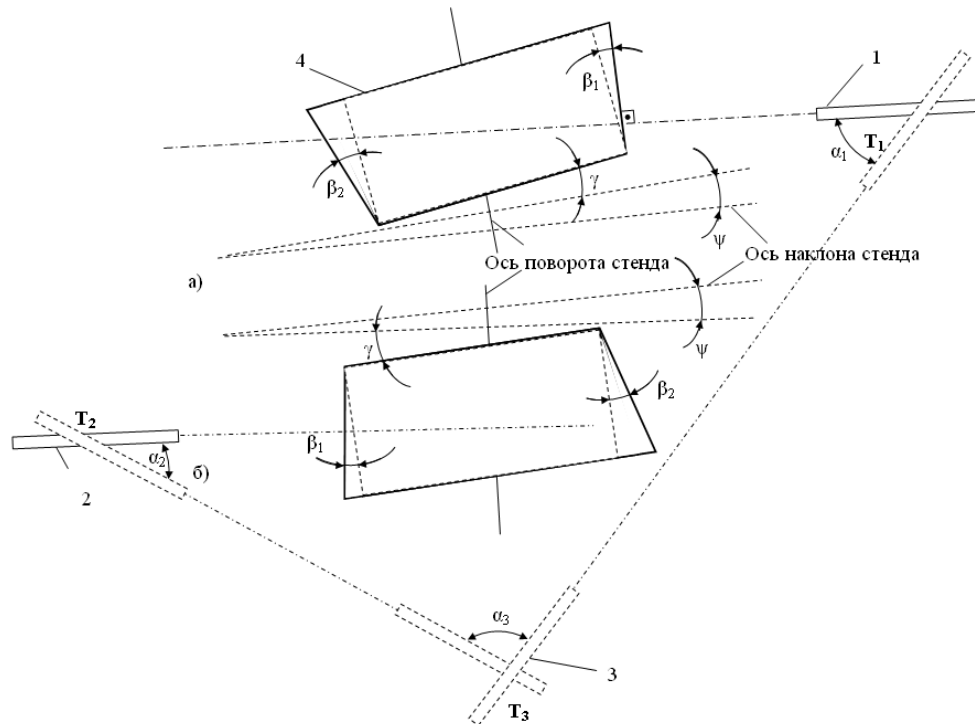


Рис. 7. Схема реализации способа оценки отклонения осей вращения

Далее разворачивают теодолит Т3 вокруг его вертикальной оси в сторону теодолита Т1 так, чтобы существовала возможность обоими кругами теодолита Т1 снять горизонтальные отсчеты $\alpha_{13}^{кл}$ и $\alpha_{13}^{кп}$ изображения подсвеченной сетки нитей теодолита Т3. При этом фиксируют третий начальный отсчет α_{31} теодолита Т3, а далее вычисляют горизонтальный отсчет α_{13} :

$$\alpha_{13} = \frac{\alpha_{13}^{кл} + (\alpha_{13}^{кп} - 180^\circ)}{2}.$$

Аналогично, развернув теодолит Т3 вокруг его вертикальной оси в сторону теодолита Т2, снимают отсчеты $\alpha_{23}^{кл}$ и $\alpha_{23}^{кп}$ и вычисляют α_{23}

$$\alpha_{23} = \frac{\alpha_{23}^{кл} + (\alpha_{23}^{кп} - 180^\circ)}{2}.$$

Кроме того, фиксируют горизонтальный отсчет α_{32} теодолита ТЗ.

Наконец, имея все входные данные, вычисляют углы α_1 , α_2 и α_3 :

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \alpha_{13} - \alpha_{11} \text{ при } \alpha_{13} \geq \alpha_{11}; \\ \alpha_2 &= \alpha_{23} - \alpha_{21} \text{ при } \alpha_{23} \geq \alpha_{21}; \\ \alpha_3 &= \alpha_{32} - \alpha_{31} \text{ при } \alpha_{32} \geq \alpha_{31}.\end{aligned}$$

После чего, исходя из известного правила суммы углов треугольника, рассчитывают величину отклонения от перпендикулярности двух осей $\psi = 180^\circ - (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$.

Далее приведем оценку методической погрешности определения исследуемого параметра.

При нахождении углов α_1 и α_2 соответственно теодолитами Т1 и Т2 измерения осуществляют двумя кругами, что исключает коллимационную ошибку теодолитов.

Определение угла α_3 рассчитывают из показаний, полученных теодолитом ТЗ одним кругом, соответственно ошибка такого измерения составляет паспортное значение величины коллимационной ошибки теодолита 3Т2КА $\Delta\psi'_{\alpha_3} = 2$ угл.с.

Кроме того величина коллимационной ошибки для теодолитов с автоколлимационным окуляром [11], может превышать паспортное значение, но не более чем на 50%, поэтому

$$(\Delta\psi_{\alpha_3})_{\max} = \Delta\psi'_{\alpha_3} \cdot 0,5 = 3 \text{ угл. с.}$$

Погрешности измерений, вызванные наличием крена и параллакса отсчетного устройства теодолитов не превышают в сумме 4,5 угл. с.

Суммарная предельная погрешность оценки отклонения от перпендикулярности двух осей предлагаемым способом будет определяться максимальным значением коллимационной ошибки теодолита ТЗ и погрешностями крена и параллакса всех (трех) теодолитов $\Delta\psi = 7,5$ угл. с.

Таким образом, оценка всех контролируемых параметров стенда двухосного автоматизированного СДА-15 выполняется в соответствии с правилами метрологического обеспечения и с действующим законодательством РФ.

Заключение

Все рассмотренные установки апробированы и успешно эксплуатируются на отечественных предприятиях, производящих инерциальные датчики и системы, а также в различных научно-исследовательских институтах России.

В настоящее время прорабатывается вопрос о возможности создания новых методов и метрологических схем динамической калибровки, предполагающих испытания стендов не только в режиме постоянного вращения, но и в более сложных режимах с субгармоническим изменением угловых положений. Придание СТА-2Т свойств имитатора движений, характерных для потенциального носителя испытуемого объекта, позволит существенно повысить эффективность как калибровки ИИМ, так и настройки алгоритмов функционирования ИНС.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №09-08-00859-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **P836/D7** (June 2006) «Draft Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers».
2. **P952/D25** (June 1997) «IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-axis Interferometric Fiber Optic Gyros».
3. <http://www.analog.com>.
4. <http://www.actidyn.com>.
5. <http://www.acutronic.com>.
6. <http://www.ideal-aerosmith.com>.
7. <http://www.imar-navigation.de>.
8. **Распопов, В. Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. - 400 с.
9. **ГОСТ 16504-81.** "Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения".
10. **ГОСТ 22267-76.** «Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров».
11. **ГОСТ 10529-96.** «Теодолиты. Общие технические условия».
12. **Одинцов, А.А.** Испытания базисных инерциальных навигационных систем на качающемся основании // Гироскопия и навигация. - 2010. - № 1. - С. 63-72.
13. **Иванов, П.А.** Разработка и исследование методов испытаний микромеханических инерциальных модулей: дис... канд. техн. наук: 05.11.16. - СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. - 137 с.

Abstract. Department of Laser Measurement and Navigation Systems at St. Petersburg State Electrotechnical University is engaged in research and development of test beds for inertial systems and sensors. We present a range of test beds from single-axis turntables to precision three-axis test beds with temperature chambers. The paper focuses on an SDA-15 automatic two-axis test bed and presents the program and procedure for its initial and periodical qualification testing. Metrological solutions include both the traditional methods of performance evaluation and a customized contactless procedure to evaluate nonorthogonality of two rotation axes.

Key words: inertial systems and sensors, research and development of test beds automatic, two-axis test bed, metrological solutions