

◆ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ ◆

УДК 531.7

DOI 10.17285/0869-7035.00100

П. А. ИВАНОВ, В. А. ЛАЗАРЕВ, Е. Д. БОХМАН, П. А. ПАВЛОВ, Ю. В. ФИЛАТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХОСНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Описана процедура измерения систематической погрешности углового позиционирования планшайбы поворотного стенда, основанная на гониометрическом методе. Проведено апробирование метода на трехосном поворотном стенде СТА-10. Выявлены возможные источники погрешности. Выполнена компенсация погрешности углового позиционирования, в результате чего удалось значительно ее снизить. Проведены исследования неустойчивости угловой скорости вращения осей поворотного стенда, а также измерена взаимная неортогональность его осей.

Ключевые слова: поворотный стенд, измерение плоского угла, автоколлиматор, многогранная призма, погрешность углового позиционирования.

Введение

Основой современных навигационных комплексов для управления движением различных подвижных объектов являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) [1–3]. В настоящее время при создании БИНС применяются интегрированные навигационные технологии, позволяющие эффективно использовать возможности спутниковой навигации. Тем не менее основными чувствительными элементами БИНС остаются акселерометры и гироскопы, смонтиро-

Иванов Павел Алексеевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры ЛИНС, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (С.-Петербург).

Лазарев Вячеслав Александрович. Студент, СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

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

ORCID 0000-0002-3948-7675.

Павлов Петр Алексеевич. Доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры ЛИНС, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». ORCID 0000-0002-6254-3145.

Филатов Юрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ЛИНС, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0002-4388-8033.

ванные в виде триад для обеспечения измерений вдоль трех взаимно ортогональных осей. Достижение высоких точностей определения навигационных параметров требует проведения специальных калибровочных процедур. Испытания и калибровка инерциальных чувствительных элементов и систем на их основе осуществляется на специализированных моделирующих поворотных стендах, предназначенных для задания и измерения угловых положений и угловых скоростей вращения планшайбы, на которую, в свою очередь, и установлен объект испытаний [4, 5]. Требования к повышению точности современных навигационных систем [6] влекут за собой необходимость улучшения точностных характеристик поворотных моделирующих стендов (точности углового позиционирования, стабильности воспроизведения угловой скорости и ортогональности осей вращения).

Анализ рынка моделирующих поворотных стендов показал, что современные их образцы обладают погрешностью углового позиционирования на уровне единиц угловых секунд [7–9]. Угловое позиционирование планшайбы стенда вокруг заданной оси происходит с помощью оптоэлектронного преобразователя угловых перемещений (энкодера), расположенного на данной оси. Систематические погрешности в показаниях энкодера могут быть связаны с неточностью его установки на вал оси, при этом способ установки энкодера на вал зависит от его конструктивных особенностей (модульная конструкция или со встроенным подшипником) [10]. При оценке точности углового позиционирования относительно осей вращения стендов предпочтение отдается прямым измерениям. Существует несколько широко применяемых методов, основанных на одном и том же принципе измерения с помощью оптических приборов, располагаемых отдельно от стенда, и мер плоского угла, жестко связанных с осями вращения стендов [11, 5].

Стабильность воспроизведения угловой скорости вращения осей в современных моделях стендов варьируется от тысячных долей до единиц процентов от заданного значения в зависимости от его величины. В традиционных схемах (с энкодерами) особенно остро стоит проблема точного воспроизведения малых угловых скоростей (0,01–0,05°/с). Тем не менее на сегодняшний день существует ряд решений данной проблемы, например использование в составе стендов (в контуре управления угловой скоростью) инерциальных чувствительных элементов [12]. В гироскопии методы прямых измерений применяются значительно реже косвенных [13] (методы фиксированного времени и фиксированного угла). При оценке стабильности угловой скорости поворотных моделирующих стендов предпочтение отдается методу фиксированного угла, так как погрешность задания угловой скорости и ее стабильность рассчитывается в среднем за один оборот, т.е. при фиксированном угле 360°. Для определения полного оборота применяется нуль-метка энкодера соответствующей оси стенда, а в качестве измерителя времени может быть использован частотомер, работающий в режиме измерения периода. При этом погрешность такой оценки будет определяться техническими характеристиками измерителя времени и временем задержки энкодера [14]. Одним из способов повышения точности задания угловой скорости является введение дополнительных измерителей [15], причем используется алгоритм комплексирования информации от избыточного количества первичных измерителей системы управления поворотного стенда. Такой подход основан на методе максимального правдоподобия. В качестве первичных измерителей в [15] рассмотрены оптический датчик угла, поплавковый датчик угловой скорости и измерители кажущегося ускорения – три центробежных и три тангенциальных акселерометра.

Современные моделирующие поворотные стелды имеют неортогональность своих осей на уровне единиц угловых секунд [7–9], их разработчики и производители корректируют данную характеристику на стадии сборки за счет введения в конструкцию стелда специальных юстировочных пластин и подложек. Неортогональность осей вращения определяется, как правило, с помощью рамного уровня и контрольных оправок, а также коленчатой оправки с прибором для измерения длин [11]. Тем не менее такие методы применимы только при наличии физической доступности одновременно к обеим осям стелда, что не всегда возможно. В последнее время широкое употребление в области оценки неортогональности осей вращения нашли методы, основанные на использовании оптического полигона (мера плоского угла, зеркало) и автоколлимационного устройства (автоколлиматор, теодолит) [5].

Статья состоит из трех разделов. В первом из них – «Объект испытаний и условия измерений» – дается краткое описание исследуемого испытательного стелда СТА-10 [16]. Далее приводится описание методов определения характеристик стелда, использованных в ходе экспериментов. В разделе «Экспериментальные исследования» приводятся полученные результаты. Особое внимание уделяется оценке и повышению точности углового позиционирования относительно всех осей поворотного стелда, кроме того, представлены результаты оценки нестабильности угловой скорости вращения осей стелда, а также измерения их взаимной неортогональности.

Объект испытаний и условия измерений

Исследование проводилось с использованием трехосного поворотного стелда СТА-10 (см. рис. 1).



Рис. 1. Трехосный поворотный стелд СТА-10

Основные контролируемые характеристики стелда СТА-10 приведены в табл. 1.

На внутренней оси и оси наклона стелда используются инкрементные оптоэлектронные датчики угла ЛИР-3170 (производства компании «СКБ ИС», Россия) с подшипником и полым выходным валом со встроенной муфтой. Предел допускаемой абсолютной погрешности датчиков составляет $\pm 2''$ (при соблюдении эксцентриситета осей вращения выходного вала датчика и вала подшипника $\pm 0,1$ мм).

Наименование характеристики	Значение		
	Внутренняя ось	Ось наклона	Ось поворота
Неортогональность осей стенда, ″, не более	10		–
	–	15	
Диапазон вращения, °	неограниченный		
Абсолютная погрешность углового позиционирования, ″, не более	10		
Диапазон задания угловой скорости, °/с	0,001 ... 1200	0,001 ... 1200	0,001 ... 600
Допустимые отклонения угловой скорости от заданного значения, %			
• в диапазоне от 0,001 до 0,01°/с	±5,0	±5,0	±5,0
• в диапазоне от 0,01 до 5°/с	±1,0	±1,0	±1,0
• в диапазоне от 5 до 50°/с	±0,5	±0,5	±0,5
• в диапазоне от 50 до 600°/с	±0,1	±0,1	±0,1
• в диапазоне от 600 до 1200°/с	±0,05	±0,05	–

На оси поворота используется модульный датчик угла с одной считывающей головкой (производства компании Renishaw, Англия). Погрешность градуировки его лимба составляет $\pm 0,38''$.

Для увеличения точности позиционирования по внутренней оси и оси наклона в стенде применяются двунаправленные радиально-упорные шариковые подшипники с зазором менее 2 мкм, а по оси поворота – комбинированный роликовый подшипник с предварительным натягом.

Исследования проводились для всех трех осей стенда с максимальной нагрузкой 35 кг при следующих температурных условиях:

- температура окружающей среды – от $+15^{\circ}\text{C}$ до $+25^{\circ}\text{C}$;
- относительная влажность – не более 80%.

Способы измерений характеристик поворотного стенда СТА-10

Измерение нестабильности угловой скорости вращения осей стенда

Измерение нестабильности угловой скорости вращения осей стенда проводилось широко известным методом определения временного интервала между импульсами нулевой метки инкрементного энкодера. В качестве средства измерений использовался электронно-счетный частотомер. Инкрементные энкодеры, применяемые в конструкции стенда, имеют возможность передавать импульс при прохождении нулевой метки на шкале энкодера. Таким образом, с помощью частотомера измеряется период вращения T (время между двумя импульсами) каждой оси стенда.

Абсолютное $\Delta\omega^A$ и относительное $\Delta\omega$ значения нестабильности угловой скорости рассчитываются по следующим формулам, %/с:

$$\Delta\omega^A = |\omega_3 - 360^\circ / T|, \quad \Delta\omega = \left| \frac{\Delta\omega^A}{\omega_3} \right| \cdot 100\%,$$

где ω_3 – заданное значение угловой скорости, °/с.

Период вращения измерялся по десяти полным оборотам относительно соответствующих осей, однако для сверхмалых скоростей (до 0,01°/с включительно), в силу длительности каждой итерации, время измерений было сокращено до трех оборотов.

Измерение взаимной неортогональности осей стенда

Средством измерения взаимной неортогональности осей поворотного стенда выступал электронный цифровой уровень, предназначенный для измерения малых углов.

Для измерения неортогональности между внутренней осью и осью наклона стенда его платформа выставляется в вертикальное положение. Уровень с помощью углового кронштейна устанавливается на платформу и снимается первый отсчет m_1 . После этого производится разворот вокруг внутренней оси стенда на 180° и уровнем снимается второй отсчет m_2 . Отклонение L_1 от вертикального положения внутренней оси стенда, мкм, рассчитывается по следующей формуле:

$$L_1 = \frac{m_1 - m_2}{2}.$$

Далее производится разворот вокруг оси наклона стенда на 180°, аналогично выполняются измерения и рассчитывается отклонение L_2 от вертикального положения внутренней оси стенда. Затем вычисляется значение неортогональности β между соответствующими осями, мкм/м:

$$\beta = \frac{L_1 - L_2}{2},$$

которое переводится в угловые секунды.

Для измерения неортогональности между осью наклона и осью поворота стенда его платформа выставляется в горизонтальное положение. Уровень устанавливается на платформу и снимается первый отсчет k_1 , мкм. Далее производится разворот вокруг оси поворота стенда на 180° и снимается второй отсчет k_2 , мкм. Отклонение N_1 от вертикального положения оси поворота стенда, мкм, рассчитывается по следующей формуле:

$$N_1 = \frac{k_1 - k_2}{2}.$$

Вслед за тем производится разворот вокруг оси наклона стенда на 180°, аналогично выполняются измерения и рассчитывается отклонение N_2 от вертикального положения оси поворота стенда. После вычисляется значение неортогональности γ между соответствующими осями, мкм/м:

$$\gamma = \frac{N_1 - N_2}{2},$$

которое переводится в угловые секунды.

Погрешность измерения будет определяться пределом допускаемой абсолютной погрешности измерений используемого уровня.

Измерение погрешности углового позиционирования

Чтобы измерить погрешность углового позиционирования каждой из осей, может быть применен гониометрический метод измерения углов многогранной опти-

ческой призмы, установленной на ось вращения поворотного стенда [17]. В отличие от классического гониометрического метода, в котором многогранная призма является объектом измерения, в данном случае многогранная призма – аналог эталонной угловой шкалы. Для оценки погрешности углового позиционирования при поворотах вокруг какой-либо оси вращения измеряются дискретные углы поворота, определяемые углами эталонной многогранной призмы. При этом в качестве средства измерения угла между нормальными к граням призмы используется, как правило, автоколлиматор, установленный на неподвижном основании [18].

Погрешность углового позиционирования для i -го поворота определяется следующим образом:

$$\Delta\varphi_i = \varphi_{\text{изм}} - \varphi_{\text{зд}},$$

где $\varphi_{\text{зд}}$ – заданный стендом угол i -го поворота, ".

В свою очередь,

$$\varphi_{\text{изм}} = i \frac{1296000}{N} + \varphi_i^{\text{П}} + \varphi_i^{\text{АК}} - \varphi_1^{\text{АК}},$$

где N – число граней многогранной призмы; $\varphi_1^{\text{АК}}$ – отсчет автоколлиматора от первой грани призмы, " ; $\varphi_i^{\text{АК}}$ – отсчет автоколлиматора от i -ой грани призмы, " ; $\varphi_i^{\text{П}}$ – отклонение от номинального значения соответствующего межгранного угла призмы (паспортное значение), " .

Как правило, заданный стендом угол i -го поворота

$$\varphi_{\text{зд}} = i \frac{1296000}{N},$$

следовательно, погрешность позиционирования стенда, " , выражается как

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i^{\text{АК}} - \varphi_1^{\text{АК}} + \varphi_i^{\text{П}}. \quad (1)$$

Погрешность измерения будет определяться погрешностями автоколлиматора, аттестации многогранной призмы и методической погрешностью, зависящей от установки многогранной призмы на ось вращения поворотного стенда.

Экспериментальное исследование

Результаты измерения нестабильности угловой скорости вращения осей стенда СТА-10

В соответствии с описанным выше методом были проведены измерения нестабильности угловой скорости вращения осей стенда СТА-10. В качестве средства измерений использовался частотомер Agilent 53131A с разрешением при измерении временного интервала 500 пс.

Результаты измерения для всех трех осей стенда приведены в табл. 2.

Стабильность скорости вращения на сверхмалых скоростях существенно зависит от количества пар полюсов и зубцового момента привода оси стенда. Так как

алгоритм расчета электрического тока в системе управления приводами оперирует малыми величинами изменения угла поворота относительно этой оси, то незначительные флуктуации тока, связанные с прохождением полюса привода, существенно сказываются на «плавности» вращения.

Т а б л и ц а 2

Заданное значение угловой скорости ω , %/с	Относительная нестабильность угловой скорости $\Delta\omega$, %
Внутренняя ось	
0,001	0,24
0,01	0,55
5	0,040
50	0,00010
600	0,00028
1200	0,00028
Ось наклона	
0,001	0,022
0,01	0,00060
5	0,00004
50	0,00003
600	0,00003
1200	0,00005
Ось поворота	
0,001	0,10
0,01	0,14
5	0,027
50	0,00012
600	0,00029

Результаты измерений нестабильности угловой скорости вращения осей станда полностью соответствуют заявленным производителем значениям.

Результаты измерения взаимной неортогональности осей станда СТА-10

По описанному выше способу были проведены измерения взаимной неортогональности осей станда СТА-10. В качестве средства измерений использовался электронный уровень М-050-03 с пределом допускаемой абсолютной погрешности измерений 2 мкм/м. Для каждого необходимого положения измерения осуществлялись трижды. Результаты измерения взаимной неортогональности осей станда приведены в табл. 3 и 4.

Результаты измерений показали, что взаимная неортогональность осей станда в несколько раз ниже заявленных производителем значений.

Неортогональность внутренней оси и оси наклона стенда

Ось наклона	Внутр. ось	Показания уровня m , мкм/м			Среднее значение показаний уровня, мкм/м	Отклонение внутренней оси от вертикального положения L , мкм/м	β , "
90°	0°	-367	-367	-367	-367	-161,8	±2,8
	180°	-43	-44	-43	-43,3		
270°	0°	-325	-319	-322	-322	-133,8	
	180°	-56	-54	-53	-54,3		

Таблица 4

Неортогональность оси наклона и оси поворота стенда

Ось наклона	Ось поворота	Показания уровня k , мкм/м			Среднее значение показаний уровня, мкм/м	Отклонение оси поворота от вертикального положения N , мкм/м	γ , "
0°	0°	-377	-379	-377	-377,7	-5,8	±2,6
	180°	-367	-365	-366	-370,0		
180°	0°	-283	-282	-281	-282,0	-18,7	
	180°	-245	-244	-245	-244,7		

Результаты измерения погрешности углового позиционирования

Измерения реализовывались с использованием 24-гранной призмы 0-го класса точности (неопределенность измерений $\pm 0,1''$). Призма устанавливалась на ось стенда таким образом, чтобы ее первая грань соответствовала нулевому положению этой оси, после чего автоколлиматором фиксировался первый отсчет. Далее производились последовательные повороты планшайбы стенда на 15° (полный оборот) и автоколлиматором снимались отсчеты от соответствующих граней призмы. В соответствии с формулой (1) вычислялась погрешность позиционирования стенда относительно каждой оси.

Для повышения репрезентативности выборки были выполнены измерения по 10 полным оборотам для каждой оси стенда. В ходе измерений по внутренней оси и оси наклона призма устанавливалась на валы контролируемых осей, а по оси поворота – на планшайбу стенда, это обусловлено тем, что в стенде не предусмотрен физический доступ к ее валу.

Ось поворота

На рис. 2 представлены результаты оценки погрешности позиционирования при измерении угла по оси поворота. Можно сделать вывод об их высокой повторяемости и наличии гармонической составляющей. Из гистограммы распределения случайных значений следует, что случайные значения распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКО $0,6''$.

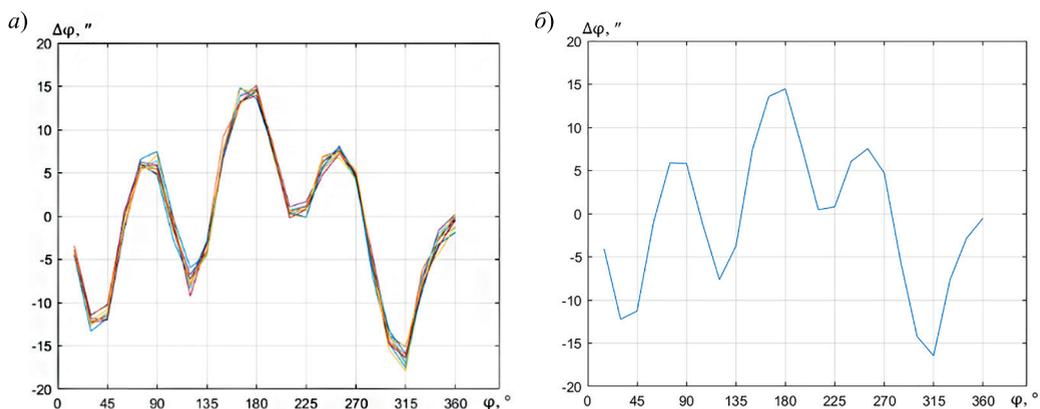


Рис. 2. Погрешность позиционирования по оси поворота
 а) по каждому обороту; б) среднее по 10 оборотам

Гармонический анализ значений погрешности позиционирования по оси поворота показал, что преобладающими по амплитуде являются первая (8,5"), вторая (2,6") и четвертая (9,8") гармоники.

Причиной возникновения 1-й гармоники является наличие эксцентриситета установки датчика угла с одной считывающей головкой [19]. Действительно, на данной оси стенда установлена модульная измерительная система с одной считывающей головкой, позволяющая обеспечить заявленную точность измерения углового позиционирования ($\pm 5''$) при соблюдении рекомендаций по установке лимба на вал с эксцентриситетом до 3 мкм [20]. В качестве лимба в данном датчике используется цельное кольцо диаметром 550 мм из нержавеющей стали, по окружности которого нанесена дорожка штрихового раstra. Внутренняя поверхность кольца выполнена в форме конуса для посадки на коническую поверхность. Чтобы предотвратить вращение и осевое смещение лимба, предусмотрено крепление кольца винтами. Такая установка позволяет юстировать радиальное смещение вала за счет применения индикатора и регулирования момента усилия затяжки крепежных винтов. В конструкции рассматриваемого стенда установка лимба на вал контролируемой оси отличалась от рекомендованной производителем, так как разместить кольцо датчика угла напрямую на валу оси поворота невозможно из-за конструктивных особенностей стенда.

На рис. 3 представлена схема крепления лимба датчика угла на ось поворота. Диск 3 крепится к ротору сервопривода; фланец 2 устанавливается на диск с помощью винтов 5 с минимальным радиальным смещением оси диска относительно оси вращения ротора. Для регулировки радиального смещения предусмотрены винты 6. Кольцо датчика угла 1 крепится к фланцу 2 винтами 4. Итоговый эксцентриситет осей вращения ротора и кольца датчика составил 6 мкм, что превышает значение, установленное производителем (3 мкм).

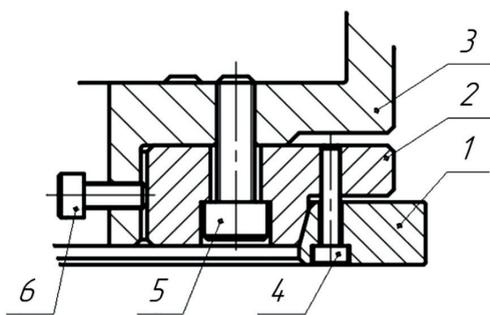


Рис. 3. Схема крепления лимба датчика угла на ось поворота стенда

Кроме того, при такой установочной схеме может присутствовать угловое смещение оси чувствительности датчика относительно оси вращения контролируемого вала, что приводит к появлению систематической погрешности на 2-й гармонике [21].

Наличие 4-й гармоники со столь большой амплитудой может быть вызвано деформацией диска датчика при его установке.

Вышеуказанная систематическая погрешность была скорректирована путем введения поправок в систему управления стандом, после чего были выполнены контрольные измерения погрешности позиционирования по данной оси, результаты представлены на рис. 4.

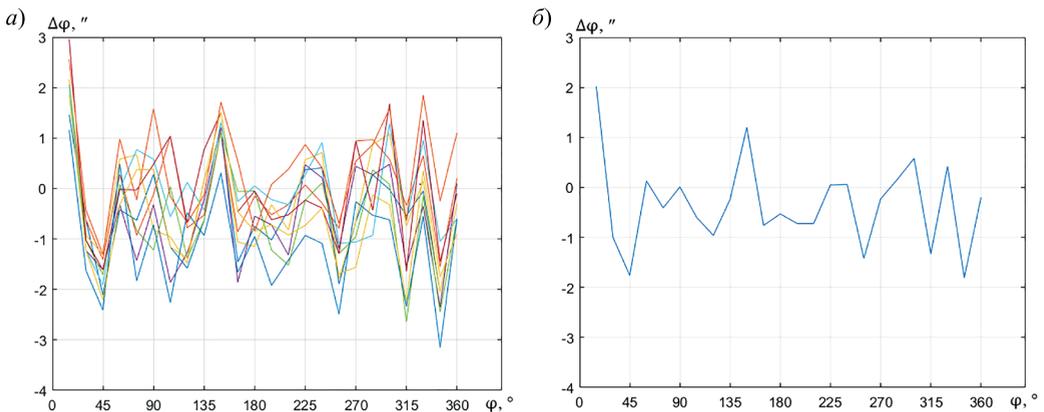


Рис. 4. Погрешность позиционирования по оси поворота (после коррекции):
а) по каждому обороту; б) среднее по 10 оборотам

Анализ измерений показал, что значение максимального отклонения от заданного значения позиционирования уменьшилось с $|15,5|''$ до $|1,9|''$. Выборочное стандартное отклонение не изменилось и составило $0,6''$.

Ось наклона

Результаты оценки погрешности позиционирования при измерении угла относительно оси наклона представлены на рис. 5.

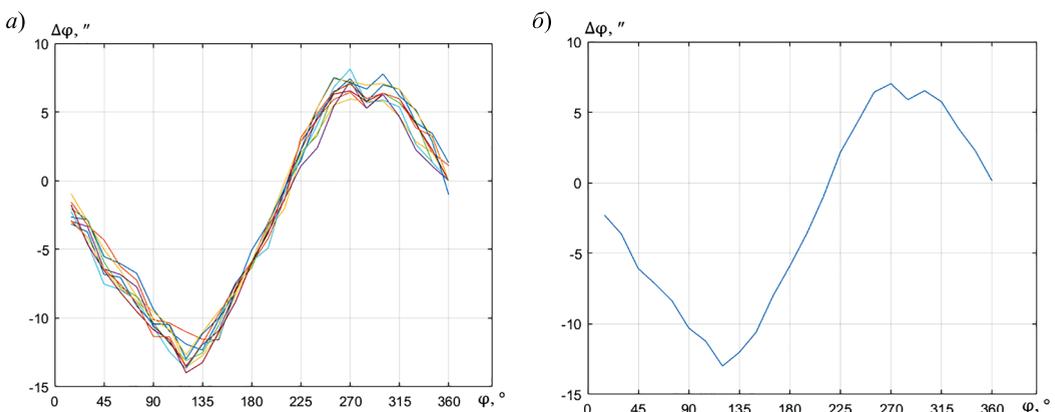


Рис. 5. Погрешность позиционирования по оси наклона:
а) по каждому обороту; б) среднее по 10 оборотам

Наблюдается высокая повторяемость результатов измерения и наличие 1-й оборотной гармоники. Анализ случайной составляющей показал, что она распределена по нормальному закону и СКП равна $0,7''$.

Рассмотрим причины возникновения избыточной погрешности углового позиционирования вокруг оси наклона. Из рис. 5 видно, что систематическая составляющая погрешности имеет синусоидальную зависимость от угла поворота. Это может быть вызвано тем, что рама стенда представляет собой «вилку», концы которой соединены с валом оси наклона, и во время поворота платформы вокруг оси наклона рама стенда подвергается деформациям, приводящим к изменению геометрического положения вала оси и гармонической погрешности с одним периодом на оборот. Данная погрешность может изменяться с течением времени, но изменения будут происходить плавно и в течение длительного периода, следовательно, целесообразно внести поправки для ее уменьшения.

На рис. 6 представлены результаты контрольных измерений погрешности позиционирования по оси наклона после внесения поправок.

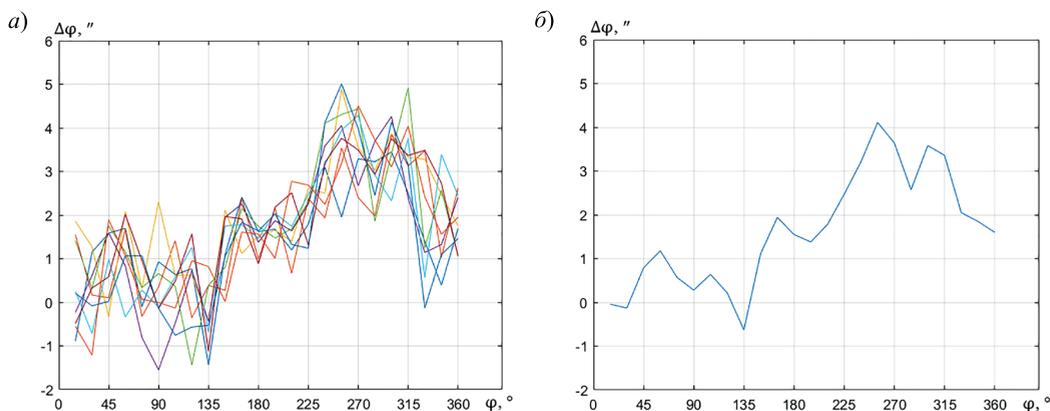


Рис. 6. Погрешность позиционирования по оси наклона (после коррекции):
а) по каждому обороту; б) среднее по 10 оборотам

Таким образом, для оси наклона значение максимального отклонения от заданного значения позиционирования уменьшилась с $|10,0|''$ до $|2,4|''$. Выборочное стандартное отклонение не изменилось и составило $0,7''$.

Внутренняя ось

Результаты оценки погрешности позиционирования при измерении угла относительно внутренней оси представлены на рис. 7.

Анализ полученных данных показал, что аналогично оси наклона наблюдаются высокая повторяемость результатов измерения и наличие 1-й оборотной гармоники. Случайная погрешность измерений распределена по нормальному закону, и СКП равна $0,7''$.

Погрешность позиционирования вокруг внутренней оси лежит в пределах $\pm 2,5''$ и, соответственно, не превышает требования, предъявляемые к стенду. Внутренняя ось в стенде слабо нагружена и наименее подвержена деформациям, следовательно, не стоит ожидать увеличения соответствующей погрешности по данной оси и осуществлять ее компенсацию.

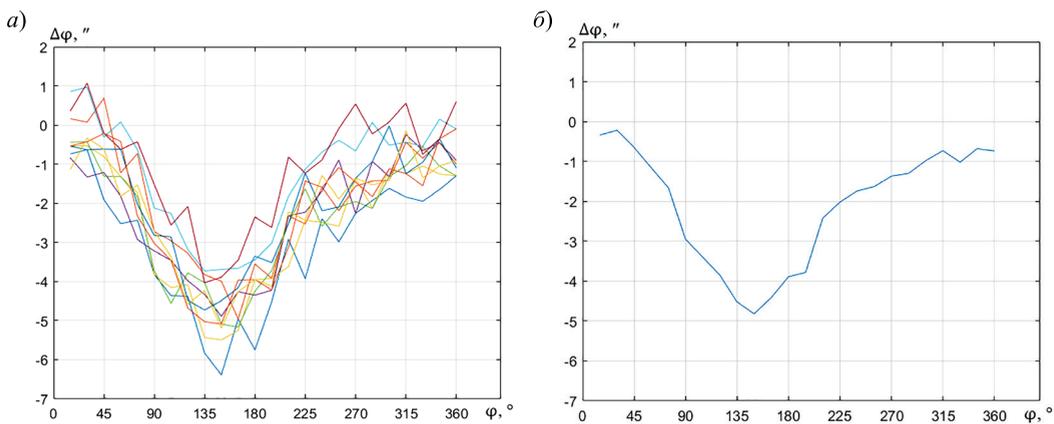


Рис. 7. Погрешность позиционирования по внутренней оси:
 а) по каждому обороту; б) среднее по 10 оборотам

Обсуждение

Представленные результаты измерений погрешности позиционирования необходимо дополнить суммарной стандартной неопределенностью измерений, которая характеризует разброс полученных значений. Суммарная стандартная неопределенность U_c представляет собой положительный квадратный корень из суммы стандартных неопределенностей входной величины, оцененных по типу *A* или *B* [22].

Исходя из формулы (1), можно записать:

$$U_c = \sqrt{(U_{\text{изм}}^2 + U_{\text{АК}}^2 + U_{\text{П}}^2)}, \quad (2)$$

где

- $U_{\text{изм}}$ – стандартная неопределенность измерения, состоящая из суммы квадрата среднеквадратического отклонения (неопределенность по типу *A*) и неопределенности по типу *B*, которая в основном определяется установкой оптической призмы на ось вращения. Согласно [21], неопределенность по типу *B*, при наклоне оптической призмы при установке ее на ось вращения с неопределенностью в $1'$, не превышает $0,02''$.
- $U_{\text{АК}}$, $U_{\text{П}}$ – неопределенности по типу *B*, которые относятся к средствам измерения – автоколлиматору и оптической призме соответственно. Эти неопределенности находятся из спецификаций на средства измерений. Используемый автоколлиматор характеризуется максимально допустимой погрешностью $0,25''$, следовательно, стандартная неопределенность автоколлиматора по типу *B* равна $0,09''$. Стандартная неопределенность оптической призмы, определяемая сертификатом о калибровке, равна $0,1''$.

Исходя из представленных выше стандартных неопределенностей, входящих в выражение (2), можно утверждать, что суммарная стандартная неопределенность измерений определяется выборочным стандартным отклонением.

Действительно, для оси поворота суммарная стандартная неопределенность, $''$, выражается как $U_c^{\text{пов}} = \sqrt{(0,6^2 + 0,02^2 + 0,09^2 + 0,1^2)} = 0,61$, расширенная неопределенность – $2U_c^{\text{пов}} = 1,2$.

Аналогично для оси наклона и внутренней оси расширенная неопределенность составит значение $1,4''$.

Заключение

Применение гониометрического метода с использованием 24-гранной оптической призмы 0-го класса точности позволило исследовать погрешности позиционирования трехосного поворотного стенда СТА-10. Проанализированы возможные источники погрешности позиционирования по каждой оси стенда. Выявленные систематические погрешности скорректированы введением поправок в систему управления стендом. Проведенные измерения после корректировки показали эффективность используемого гониометрического метода. Неисключенная систематическая погрешность позиционирования по оси поворота составила $|1,9 \pm 1,2|''$, по оси наклона – $|2,4 \pm 1,4|''$. Корректировка по внутренней оси не проводилась, погрешность составила $|2,5 \pm 1,4|''$.

Кроме того, произведена оценка нестабильности угловой скорости вращения осей стенда, а также измерена взаимная неортогональность его осей.

Полученные результаты показывают, что трехосный поворотный стенд СТА-10 (с использованием корректировки погрешности позиционирования) имеет точностные характеристики на уровне лучших мировых образцов.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ №20-19-00412.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Titterton, D., Weston, J.**, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Institution of Engineering and Technology, 2005.
2. **Анучин О.Н., Емельянецв Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации (БИНС и БИСО) / под общ. ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1999.
3. **Tzartas, D.A.**, Inertial navigation: From Gimbaled platforms to strapdown sensors, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3), 5937303, pp. 2292–2299.
4. **Веремеенко К.К., Галай И.А.** Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном стенде // Труды МАИ. [Электронный ресурс]. 2013. №63.
5. **Боронахин А.М., Иванов П.А., Бохман Е.Д., Филатов Ю.В., Сувор И.Л.** Новый комплекс средств для испытаний малогабаритных инерциальных систем и их чувствительных элементов // Гироскопия и навигация. 2011. №4 (75). с. 32-42.
6. **Патюрель И., Онтас И., Лефевр Э., Наполитано Ф.** Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ с уходом одна морская миля в месяц: мечта уже достижима? // Гироскопия и навигация. 2013. №3. С. 3–13.
7. **Gheorghe, M.**, Advanced Calibration Method, with Thermal Compensation, for 3-Axis MEMS Accelerometers, *Romanian journal of information science and technology*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 255–268.
8. **Commercial Brochure** Motion Simulation. Actidyn active dynamics. URL: <https://www.actidyn.com>.
9. **Niederberger, A.S.P., Kälin, R., Revel, S., Smajlovic, D.**, Rate Table Improvements in Rate Stability using Look-up Tables, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2018.
10. **Probst, R.**, Self-calibration of divided circles on the basis of a prime factor algorithm. *Measurement, Science and Technology*, 2008, vol. 19, no.1, 015101.
11. **ГОСТ 22267-76.** Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров. М.: Издательство стандартов, 1988. 149 с.
12. **Ermakov, R.V., Seranova, A.A., Lvov, A.A., Kalikhman, D.M.**, Optimal Estimation of the Motion Parameters of a Precision Rotating Stand by Maximum Likelihood Method, *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 2, pp. 139–146
13. **Иванов В.А.** Метрологическое обеспечение гироскопов. Л.: Судостроение, 1983. 180 с.
14. **Бурнашев М.Н., Лукьянов Д.П., Павлов П.А., Филатов Ю.В.** Лазерные системы динамической аттестации угловых преобразователей различного типа // Изв. ГЭТУ. 1997. Вып. 509. С. 36–40.

15. Kalikhman, D.M., Kalikhman, L.Ya., Deputatova, E.A., Krainov, A.P., Ermakov, R.V., Krivtsov, E.P., Yankovsky, A.A., Lvov, A.A., Ways of extending the measurement range and increasing the accuracy of rotary test benches with inertial sensory elements for gyroscopic devices, *25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2018, pp. 1–6.
16. Каталог продукции компании ООО «ИНЕРТЕХ» [Электронный ресурс]. URL: <http://inertech-ltd.com/wp-content/uploads/2022/01/Каталог-2021.pdf>.
17. Анникст Д.А. и др. Высокоточные угловые измерения / под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
18. Голубовский Ю.М., Захаренков В.Ф., Писарев В.Н., Иванов Д.В. Фотоэлектрический автоколлиматор – анализатор спектра угловых перемещений объекта // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. №12. С. 6–10.
19. Watanabe, T., Kon, M., Nabeshima, N., Taniguchi, K., An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA, *Measurement Science and Technology*, 2014, vol. 25(6), 065002.
20. Carr, J., Desmulliez, M.Y.P., Weston, N., McKee, A., Langton, C. Optical encoder for ultra precision metrology systems, *Proceedings of the 10th Anniversary International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2008, vol. 2, pp. 405–409.
21. Павлов П.А. Методика исследования погрешности лазерного динамического гониометра // *Измерительная техника*. 2020. № 2. С. 29–32.
22. ГОСТ Р 54500.3-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-3: 2008. Неопределенность измерения.

Ivanov, P.A., Lazarev, V.A. (St. Petersburg State Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russia), Bokhman, E.D. (Inertech JSC, St. Petersburg, Russia), Pavlov, P.A., and Filatov, Yu.V. (St. Petersburg State Electrotechnical University LETI) Studying the Performance of a Three-Axis Rate Table for Navigation System Tests, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 3 (118), pp. 80–93.

Abstract. A procedure for measuring the systematic error in angular positioning of a rate table platform based on goniometrical method is described. The method has been tested on a three-axis rate table STA-10. Possible error sources have been detected. The positioning error has been compensated and greatly reduced. Instability of rate table axes rotation rate has been studied, and nonorthogonality of its axes has been measured.

Key words: rate table, plane angle measurement, autocollimator, optical polygon, angular positioning error.

Материал поступил 07.06.2022