

УДК 531.7

# МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РЯД МОДЕЛИРУЮЩИХ ПОВОРОТНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ НА ИХ ОСНОВЕ

**П.А. Иванов**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*  
Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, лит. Ф  
E-mail: paivanov@etu.ru

**Ю.В. Филатов**

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»*  
Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, лит. Ф  
E-mail: yvfilatov@etu.ru

**Е.Д. Бохман**

*ООО «ИНЕРТЕХ»*  
Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Инструментальная, 3, лит. К  
E-mail: edbokhman@mail.ru

**Ключевые слова:** инерциальные навигационные системы, моделирующие поворотные стенды, методы и средства калибровки инерциальных чувствительных элементов.

**Аннотация:** Приведены результаты разработки высокоточных моделирующих поворотных стендов для калибровки и испытаний инерциальных чувствительных элементов и различных навигационных систем. Проведен анализ рынка современных моделей поворотных стендов. Показано, что на отечественном рынке присутствуют конкурентные образцы стендов российского производства. Представлен ряд моделирующих поворотных стендов (ИНЕРТЕХ), закрывающих широкий спектр потребительских задач и требований. Приведены результаты исследования характеристик образцов стендов, где показана их воспроизводимость и соответствие заявленным производителем значениям.

## 1. Введение

Основными чувствительными элементами инерциальных навигационных систем (ИНС) являются акселерометры и гироскопы, смонтированные в корпусе системы в виде триад для обеспечения измерений вдоль трех взаимно ортогональных осей. Высокие точности навигационных параметров ИНС требуют организации и проведения определенных калибровочных процедур на специализированных моделирующих поворотных стендах. Такие стенды предназначены для задания и измерения угловых положений и угловых скоростей вращения планшайбы, на которую установлен объект испытаний [1, 2]. Требования по повышению уровня точности современных навигационных систем [3] влекут за собой либо необходимость разработки новых методов их испытаний и калибровки, либо повышения точностных характеристик средств испытаний (точности углового позиционирования, стабильности

воспроизведения угловой скорости, биения осей вращения и их взаимной ортогональности).

Анализ рынка моделирующих поворотных стенов показал, что современные модели обладают точностью углового позиционирования на уровне единиц угловых секунд [4-7]. Стабильность воспроизведения угловой скорости вращения осей стенов варьируется от тысячных долей до единиц процентов от заданного значения в зависимости от величины этого значения. Современные моделирующие поворотные стеноды имеют неортогональность своих осей и их биение на уровне единиц угловых секунд. Для проведения испытаний в условиях, отличных от нормальных, стенод может быть оснащен климатической камерой, позволяющей изменять температурные условия в пределах от  $-70$  до  $+100$  или вакуумной камерой, способной создавать пониженное давление до  $1,3 \cdot 10^{-4}$  Па. Камера обычно располагается таким образом, чтобы вращаться по всем осям, кроме той, на которую крепится планшайба стенода.

## 2. Анализ современного рынка поворотных стенодов

На мировом рынке поворотных стенодов на данный момент представлен широкий ассортимент моделей от различных отечественных и зарубежных («Ideal Aeromsmith», «Actidyn systems», «Acutronic») производителей. Стеноды различают по количеству осей поворота планшайбы, по уровню точности, по массе полезной нагрузки, по наличию термокамеры и множеству других эксплуатационных и технических характеристик, закрывая тем самым широкий спектр потребительских требований.

В таблицах 1 и 2 представлены характеристики одноосных и двухосных поворотных стенодов, соответственно, различных производителей.

Таблица 1. Характеристики одноосных поворотных стенодов.

Производитель	ИНЕРТЕХ	Ideal Aeromsmith	Actidyn systemes	Acutronic
Модель	СОА-2.30	2001P	ST1112	AC1120Si
Диапазон воспроизведения угловой скорости, %с	$\pm 0,1/\pm 3000$	$\pm 0,0001/\pm 3000$	$\pm 2000$	$\pm 1200$
Допускаемое отклонение угловой скорости от заданного значения, %, не более	0,001	0,0001	0,001	0,0001
Диапазон воспроизведения углового положения, °	$\pm 360$			
Предел допускаемой абсолютной погрешности позиционирования, "	$\pm 2,5$	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 3$
Максимальное угловое ускорение, %с <sup>2</sup> , не менее	10000	6300	10000	12000
Полоса пропускания (по уровню -3дБ с номинальной нагрузкой), Гц	81	100	50	80
Биение оси стенода, ", не более	2	-	1	2

Таблица 2. Характеристики двухосных поворотных стенодов.

Производитель	ИНЕРТЕХ	Ideal Aeromsmith	Actidyn systemes	Acutronic
Модель	СДА-2.50Т	2002PG	ST 2356C	AC2267-TC
Диапазон воспроизведения угловой скорости, %с	$\pm 0,001/\pm 1000$	$\pm 1000$	$\pm 1200$	$\pm 1200$
- внутренняя ось	$\pm 0,001/\pm 600$	$\pm 360$	$\pm 600$	$\pm 600$
- внешняя ось				

Допускаемое отклонение угловой скорости от заданного значения, %, не более	0,0005	0,0001	0,0001	0,0001
Диапазон воспроизведения углового положения, °	± 360			
Предел допускаемой абсолютной погрешности позиционирования, " <ul style="list-style-type: none"> <li>- внутренняя ось</li> <li>- внешняя ось</li> </ul>	±1 ±1,5	±3	±3	±1 ±1,5
Максимальное угловое ускорение, °/с <sup>2</sup> , не менее <ul style="list-style-type: none"> <li>- внутренняя ось</li> <li>- внешняя ось</li> </ul>	3000 650	1000 190	2800 1000	3000 200
Полоса пропускания (по уровню - 3дБ с номинальной нагрузкой), Гц <ul style="list-style-type: none"> <li>- внутренняя ось</li> <li>- внешняя ось</li> </ul>	50 15	75 20	20 10	50 15
Биеение осей стэнда, ", не более <ul style="list-style-type: none"> <li>- внутренняя ось</li> <li>- внешняя ось</li> </ul>	2 5	3 5	5 5	2 5
Неортогональность осей стэнда, "	5	5	2	5
Диапазон воспроизводимой температуры, °С	от -70 до +85	от -65 до +85	от -55 до +85	от -55 до +100

Сравнительный анализ показал, что значения характеристик рассмотренных моделей стэндов находятся примерно на одном уровне, в том числе и для моделей отечественных производителей.

### 3. Исследование характеристик поворотных стэндов

Компания «ИНЕРТЕХ» имеет полный цикл производства и уже более десяти лет разрабатывает, производит и поставляет моделирующие поворотные стэнды, предназначенные для калибровки и испытаний инерциальных датчиков, гироскопических приборов и навигационных систем различного назначения и класса точности.

На рис. 1 представлен ряд одноосных (СОА) поворотных стэндов производства компании ИНЕРТЕХ.



Рис. 1. Одноосные поворотные стэнды (ИНЕРТЕХ).

В таблице 3 приведены результаты исследования характеристик трех образцов стэнда COA-2.30.

Таблица 3. Характеристики стенда СОА-2.30.

Наименование характеристики	Нормированное значение (диапазон значений)	Действительное значение		
		№ 1	№ 2	№ 3
Диапазон воспроизведений угловой скорости, %/с	от $\pm 0,1$ до $\pm 3000$	от $\pm 0,1$ до $\pm 3000$		
Диапазон воспроизведения углового положения, °	$\pm 360$	$\pm 360$		
Допускаемое отклонение угловой скорости от заданного значения при измерении за один оборот, %	$\pm 0,001$	0.0009426	0.0008454	0.0004788
Предел допускаемой абсолютной погрешности позиционирования, угл. секунда	$\pm 2,5$	1.85	2.20	2.37
Разрешение позиционирования, угл. секундах	0,0036	0,0036		
Диапазон воспроизведений углового ускорения, %/с <sup>2</sup>	от $\pm 0,01$ до $\pm 10000$	от $\pm 0,01$ до $\pm 10418.11$	от $\pm 0,01$ до $\pm 10505.17$	от $\pm 0,01$ до $\pm 10375.33$
Полоса пропускания (-3 Дб), Гц, не менее	81	108.5	112	115.5
Биение оси вращения, угл. секунда	2	1.1	0.65	0.57

На рис. 2 представлен ряд двухосных (СДА) поворотных стендов производства компании ИНЕРТЕХ.



Рис. 2. Двухосные поворотные стенды (ИНЕРТЕХ).

В таблице 4 приведены результаты исследования характеристик одного образца стенда СДА-2.50Т.

Таблица 4. Характеристики стенда СДА-2.50Т.

Наименование характеристики	Номинальное значение	Измеренное значение
Допускаемое отклонение угловой скорости, %, не более		
- внутренняя ось	0,0005	0,00041
- внешняя ось		0,00031

<b>Допускаемая погрешность позиционирования, "</b>		
- внутренняя ось	$\pm 3$	0,32
- внешняя ось	$\pm 4,5$	2,05
<b>Максимальное угловое ускорение, <math>^\circ/\text{с}^2</math>, не менее</b>		
- внутренняя ось,	3000	3099,73
- внешняя ось	650	658,93
<b>Полоса пропускания (по уровню -3дБ), Гц, не менее</b>		
- внутренняя ось	50	79,6
- внешняя ось	15	21,5
<b>Биение осей станда, ", не более</b>		
- внутренняя ось	2	0,3
- внешняя ось	3	2,7
<b>Неортогональность осей станда, ", не более</b>	5	1,75
<b>Диапазон воспроизводимой температуры в полезном объеме камеры, <math>^\circ\text{C}</math></b>	от -70 до +85	от -70 до +85
<b>Отклонение достигнутого значения температуры в полезном объеме камеры от заданного значения, <math>^\circ\text{C}</math></b>	$\pm 2,0$	0,85

Отдельно стоит отметить, что компанией ИНЕРТЕХ совместно с Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом «ЛЭТИ» (на базе Инжинирингового центра «Навигация и управление движением») в 2021 году разработан и введен в эксплуатацию трехосный поворотный станд СТА-2 (рис. 3).



Рис. 3. Трехосный поворотный станд СТА-2.

Проводилось подробное исследование характеристик станда СТА-2. Измерение нестабильности угловой скорости вращения осей станда проводилось широко используемым методом определения временного интервала между импульсами нулевой метки инкрементного энкодера. В качестве средства измерений использовался частотомер Agilent 53131A с разрешением при измерении временного интервала 500 пс. Результаты измерения для всех трех осей станда приведены в таблице 5.

Таблица 4. Результат измерений угловой скорости вращения осей станда СТА-2.

Заданное значение угловой скорости $\omega_z$ , $^\circ/\text{с}$	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

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

Для измерения погрешности углового позиционирования для каждой из осей станда был применен гониометрический метод измерения углов многогранной оптической призмы, установленной на ось вращения поворотного станда. Гармонический анализ полученных значений погрешности позиционирования показал, что преобладающими по амплитуде являются первая (8,5"), вторая (2,6") и четвёртая (9,8") гармоники. Данная систематическая погрешность была скорректирована путем введения поправок в систему управления стандом, после чего были проведены контрольные измерения погрешности позиционирования. Анализ измерений показал, что значение максимального отклонения от заданного значения позиционирования уменьшилось с |15,5| " до |1,9| ".

Уровень технических и эксплуатационных характеристик станда СТА-2 сопоставим с уровнем соответствующих характеристик зарубежных аналогов. На сегодняшний день осуществляется серийный выпуск подобного оборудования.

## 4. Заключение

Сравнительный анализ современных моделей поворотных стандов, предназначенных для испытаний инерциальных чувствительных элементов и систем на их основе, показал, что на рынке присутствуют конкурентные образцы подобного оборудования отечественного производства. В работе приведены результаты исследования метрологических характеристик одноосных и двухосных стандов производства компании ИНЕРТЕХ (г. Санкт-Петербург).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-19-00412П.

## Список литературы

1. Веремеенко К.К., Галай И.А. Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном станде // Труды МАИ. 2013. № 63.
2. Боронахин А.М., Иванов П.А., Бохман Е.Д., Филатов Ю.В., Суворов И.Л. Новый комплекс средств для испытаний малогабаритных инерциальных систем и их чувствительных элементов // Гироскопия и навигация. 2011. № 4 (75). С. 32-42.

3. Колотилов Е.Д., Данилин П.Е., Зайцева Н.А. Особенности проектирования и разработки современных систем самолётовождения // Навигация и управление летательными аппаратами. 2018 вып. № 23. С. 2-11.
4. Официальный сайт компании «ИНЕРТЕХ». URL: [https:// http://inertech-ltd.com](https://http://inertech-ltd.com).
5. Официальный сайт компании «Ideal Aerosmith». URL: <https://www.ideal-aerosmith.com>.
6. Официальный сайт компании «Actidyn systems». URL: <https://www.actidyn.com>.
7. Официальный сайт компании «Acutronic». URL: <https://www.acutronic.com/simulation-test>.