

**КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ
ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

© 2018 С.Н. Шапошников, О.С. Ефремкин

АО «Ракетно – космический центр «Прогресс», г. Самара

Статья поступила в редакцию 28.05.2018

В статье рассмотрены материалы создания методики по определению угловых положений посадочных мест для чувствительных элементов системы управления движением лазерной измерительной системой, описаны основные средства измерений и принципы их работы. Показаны преимущества лазерных измерительных систем. Проанализированы сложности, которые могут возникнуть при интеграции измерительных систем в производство, представлены результаты произведенных измерений.

Ключевые слова: космический аппарат, контроль геометрии, чувствительные элементы, высокоточные измерения, лазерная измерительная система.

Современные космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в т.ч. радиолокационного наблюдения (РЛН), характеризуются наличием большого количества устанавливаемых внешних устройств. К таким элементам относятся звёздные и солнечные датчики, антенны высокоскоростной радиолонии, передающие устройства, антенны системы спутниковой навигации и др. Звездные датчики и угловые измерители являются чувствительными элементами системы управления движением КА. Эти устройства системы управления предназначены для оценки параметров полета или их отклонений от заданных значений. Размещение чувствительных элементов СУД на корпусе КА оказывает существенное влияние на проектный облик КА и целевые характеристики космической системы (точность привязки координат снимка и др.) [1].

В процессе производства космических аппаратов, главными измерительными задачами являются: контроль геометрии отдельных деталей и проверка взаимного расположения элементов изделия, в частности при креплении высокоточных систем координации КА. Чаще всего необходимо проводить контроль в тех местах, где большую роль играет точность измерения положения поверхности (установка систем управления движением, геометрическая стабильность поверхностей под различными воздействиями, посадочные места высокой точности установки), так как от параметров изготавливаемого устройства зависит качество всего изделия. Контроль геометрии крупногабаритных частей

деталей и сборок, который проводят с помощью шаблонов, занимает значительную часть в измерениях авиационной и космической отрасли. Данная технология контроля отработана и не требует высокой квалификации рабочих, однако она имеет ряд существенных недостатков, так как на каждую группу элементов требуется индивидуальный заготовленный шаблон. Также эта технология не позволяет в полной мере оценить величину отклонения от требований, определенных в конструкторской документации. При каких либо доработках в конструкции изделия необходимо заменять шаблон [2].

Поэтому, в процессе разработки и производства КА выявляется потребность во внедрении экономичных и эффективных средств диагностики и контроля геометрии изделий. Для решения этих задач можно использовать современные измерительные системы. Большая часть данных систем основана на применении оптических методов измерений. Существует несколько видов данных систем: лазерные радары, лазерные трекары, теодолиты, интерферометры, фотограмметрические измерительные системы, которые можно внедрять на разных стадиях производства [3].

Эти системы сочетают в себе высокую точность, производительность, бесконтактность измерений и получения результата в цифровой форме. Еще одним плюсом данных систем, является их компактность и мобильность, данные системы можно легко разместить в сборочном цехе или производить измерения с выгодных положений, в отличие от координатно-измерительных машин, для которых необходимо размещение измеряемого объекта в рабочей зоне стола прибора [4].

Одним из самых универсальных измерительных средств, применяемых для решения

Шапошников Сергей Николаевич, ведущий инженер-конструктор. E-mail: serg9ff@mail.ru

Ефремкин Олег Сергеевич, начальник группы. E-mail: olegef1@rambler.ru

указанных выше задач, являются системы лазерные координатно-измерительные, так называемые лазерные трекеры.

Лазерные трекеры состоят из высокоточных лазерных измерителей расстояний на базе абсолютного дальномера (ADM), и интерферометра (IFM), высокоточных измерительных датчиков вертикального и горизонтального углов и ЭВМ, ADM представляет собой дальномер с инфракрасным источником излучений, который реализует фазовый принцип измерения расстояний. В основе принципа действий IFM, построенного с использованием He-Ne лазера, лежит интерференционный метод измерения расстояний [5].

Программное обеспечение определяет координаты центра элемента, его геометрические параметры и отклонения формы, также возможно контролировать линейно-угловые размеры между измеренными элементами и осуществлять анализ их взаимного расположения (непараллельность, неплоскостность и т.д.). Возможно сравнение криволинейных поверхностей деталей с CAD моделью в программном обеспечении.

На рис. 1 представлена принципиальная схема определения координат отражателя (x_0, y_0, z_0) по результатам замеров горизонтального (H_z) и вертикального (V) углов и расстояния (D) с помощью лазерного трекера. В данном случае определяются координаты отражателя в полярной системе координат трекера, с началом системы координат в точке пересечения осей вращения прибора вокруг своей вертикальной оси и оси

вращения подвижной головки. После выполнения измерений на 3 и более контрольные точки объекта с известными координатами, все остальные измерения могут быть автоматически пересчитаны уже в системе координат объекта. Погрешность при измерениях составляет 10 мкм.

Для определения координаты используются данные формулы:

$$\begin{aligned} x_0 &= D * \cos H_z; \\ y_0 &= D * \cos(90^\circ - H_z); \\ z_0 &= D * \cos V. \end{aligned}$$

В процессе разработки космического аппарата радиолокационного наблюдения для обеспечения целевых характеристик высокодетального радиолокационного комплекса (ВРЛК) возникла необходимость организации работ по измерению фактического углового положения посадочных мест под чувствительные элементы системы управления движением (ЧЭ СУД) относительно системы координат БА ВРЛК и дальнейшего использования результатов этих измерений в системе управления движением (СУД).

Цель работы – создание методики определения фактического углового положения посадочных мест под установку чувствительных элементов системы управления движением относительно СК БА ВРЛК.

Задачами работы является:

- определение координат контрольных точек центра базового отверстия, базового паза и базовой плоскости на раме БА;
- определение координат контрольных точек на посадочных местах под установку чув-

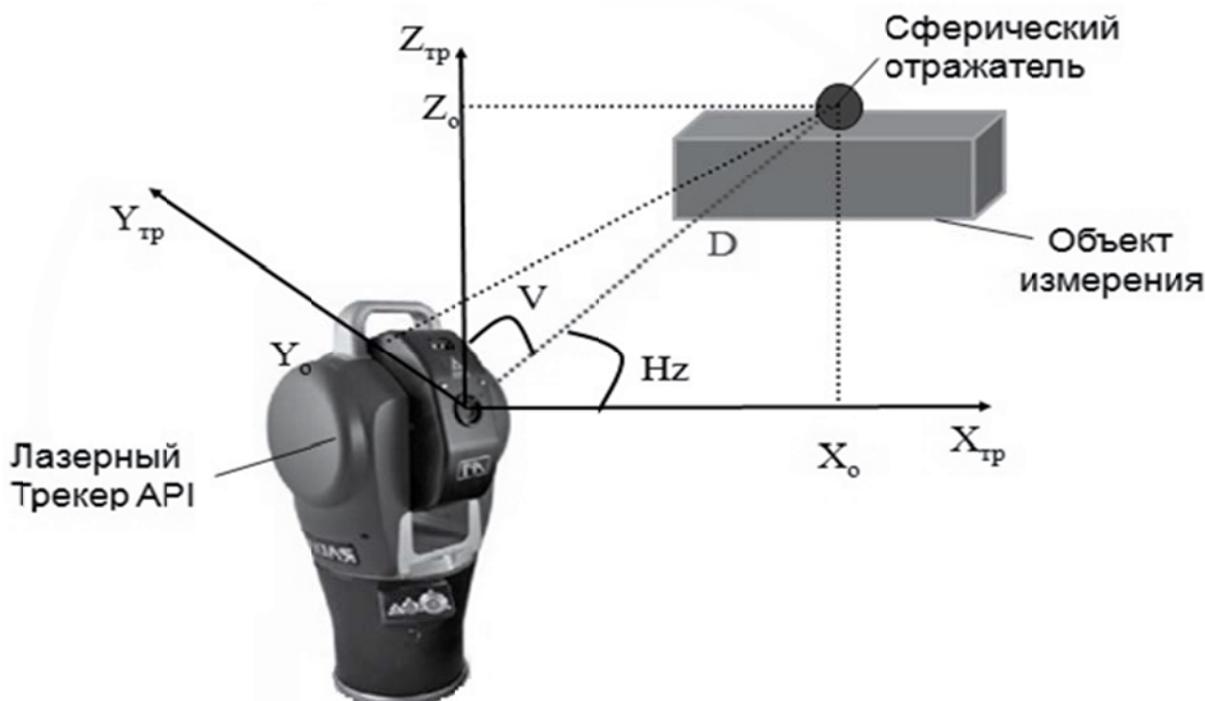


Рис. 1. Принцип работы лазерной измерительной системы

ствительных элементов системы управления движением.

Объектом измерения является рама БА ВРЛК с кронштейнами ЧЭ СУД, конструктивная схема которой представлена на рис. 2.

Измерения координат контрольных точек для определения углового положения кронштейнов ЧЭ СУД относительно СК БА ВРЛК должны выполняться лазерным трекером API Radian, путем касания измеряемых элементов поверхностью сферического высокоточного отражателя. Измеряются точки на базовой плоскости, последовательно прикладывая отражатель к поверхности площадок стыковки БА ВРЛК с шагом 5 мм и фиксируя его координаты относительно СК прибора. Далее определяются центр базового отверстия и базовый паз. Измерение положения кронштейнов ЧЭ СУД проводится аналогично, путем последовательного приложения сферического отражателя к каждой из площадок.

После замера всех элементов конструкции следует этап обработки полученных данных.

По окончании измерений в ПО Spatial

Analyzer имеются группы измеренных точек для каждого контролируемого элемента объекта измерений. Анализ углового положения ЧЭ СУД проводится с использованием дополнительных построений по измеренным точкам в следующей последовательности:

- создание СК БА ВРЛК в ПО Spatial Analyzer;
- создание усредненную плоскость площадки под ЧЭ СУД по точкам, измеренным на ее поверхности;
- создание нормали к посадочной поверхности ЧЭ СУД (ось OZПСКi);
- создать линию ПОZ1, как проекцию нормали к посадочной плоскости ЧЭ СУД (ось OZПСКi) на плоскость ХСКБАВРЛКОСКБА ВРЛК ZСК БА ВРЛК;
- определение угла α_z , между линией ПОZ1 и осью ОСК БА ВРЛК ХСК БА ВРЛК и угла α_x , между линией Л1П и осью ОСК БА ВРЛК ХСК БА ВРЛК (рис. 3);
- определение угла β_z , между нормалью к посадочной плоскости «БИУС-М (1)» (ось OZПСКi) и плоскостью ХСК БА ВРЛКОСК БА ВРЛКZСК БА ВРЛК (рис. 4);

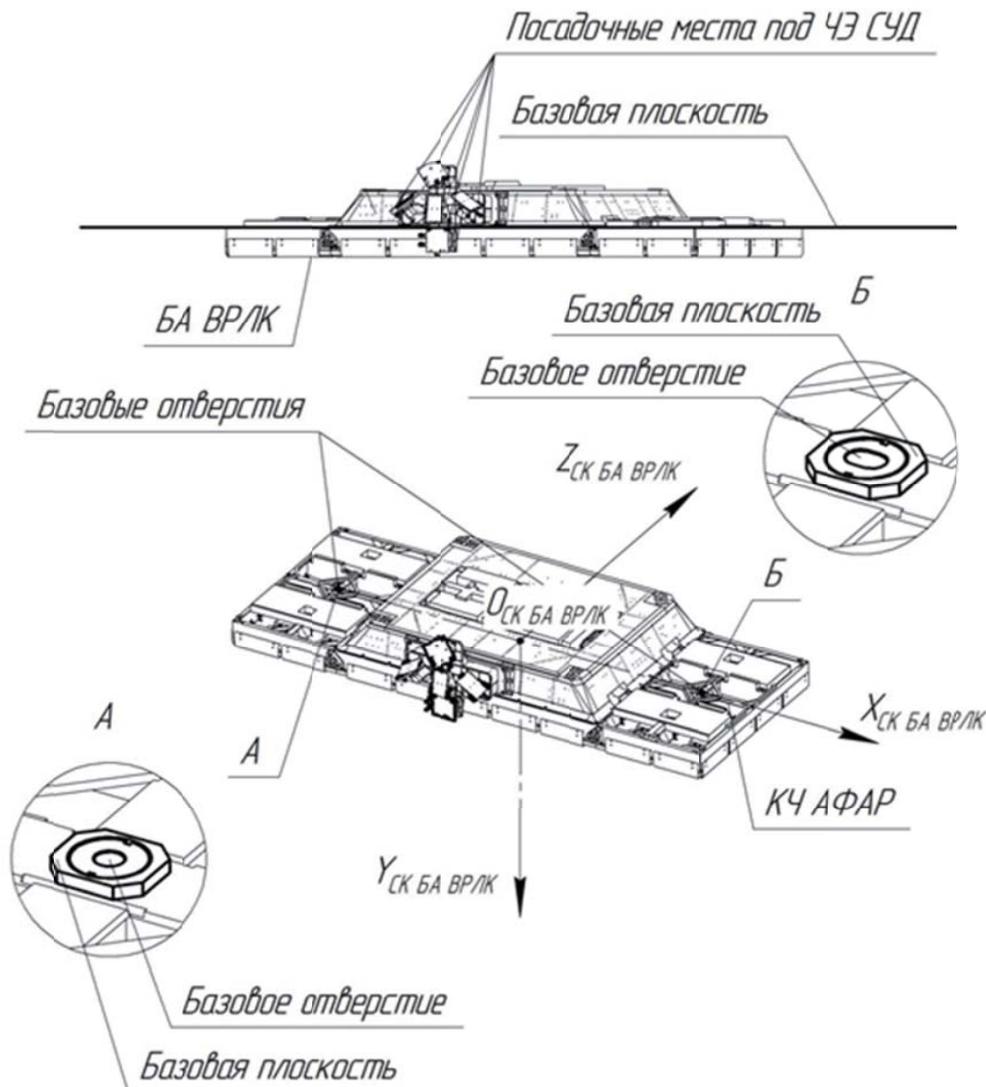


Рис. 2. Конструктивная схема рамы БА ВРЛК с кронштейнами ЧЭ СУД

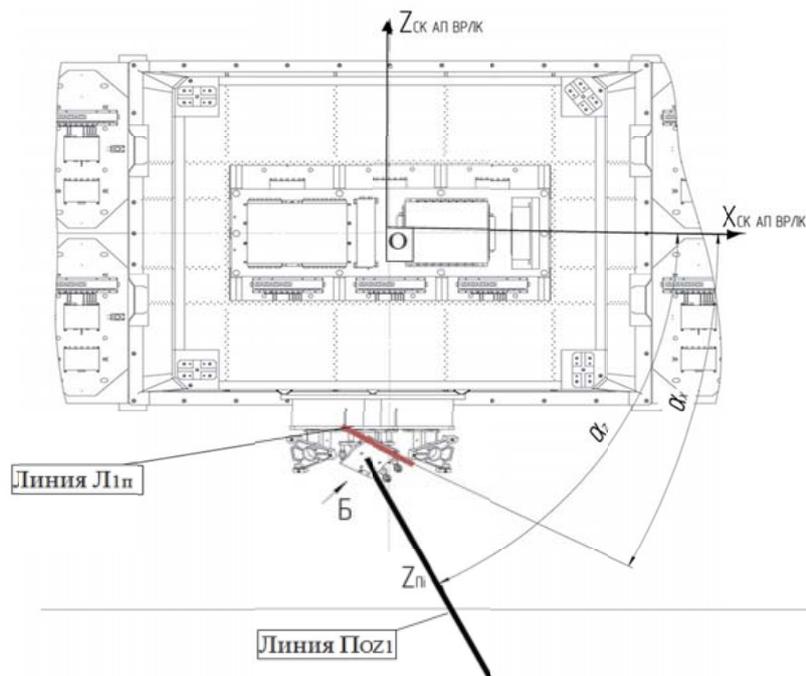


Рис. 3. Углы α_z и α_x для ЧЭ СУД

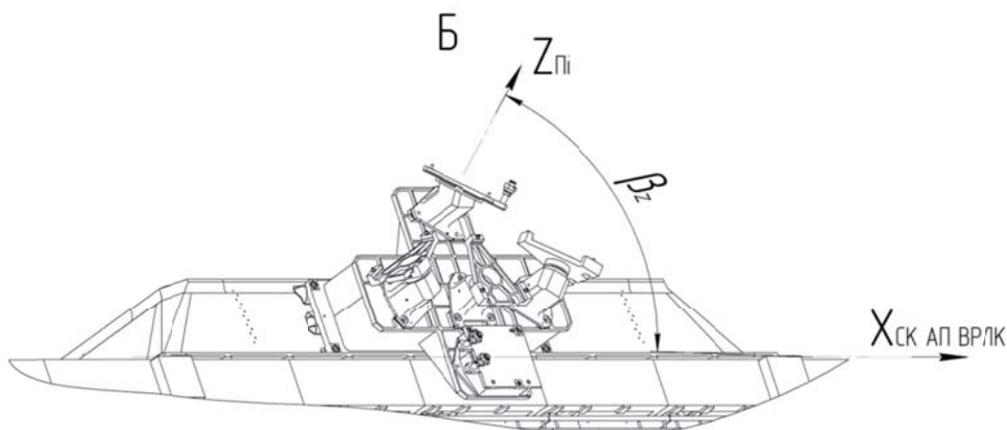


Рис. 4. Угол β_z для ЧЭ СУД

- проведение линии Л1 через центры двух окружностей;
- создание проекции линии Л1 на плоскость Х СК БА ВРЛК О СК БА ВРЛК Z СК БА ВРЛК, – линии Л1п;
- определение угла β_x между линией Л1 и плоскостью Х СК БА ВРЛК О СК БА ВРЛК Z СК БА ВРЛК (рис. 5);

Предельная погрешность измерения координат определяется измерительной предельной погрешностью лазерного трекера АР1, погрешностью установки отражателя, а также стабильностью конструкции и опоры.

Оценка погрешности углового положения посадочных мест под приборы проводилась на основе результатов 10 измерений. Полученные значения суммарной погрешности при измерении углового положения посадочных мест под ЧЭ СУД не должны превышать 45".

Оценка измеряемой величины, за которую принимают среднеарифметическое значение

измеряемой величины (углового положения посадочных мест под приборы) вычисляется по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n},$$

где X – измеряемая величина; n – количество выполненных циклов измерений.

Среднеквадратическое отклонение группы результатов измерений вычисляется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}.$$

Доверительные границы случайной погрешности оценки измеряемой величины углового положения посадочных мест вычисляются по формуле:

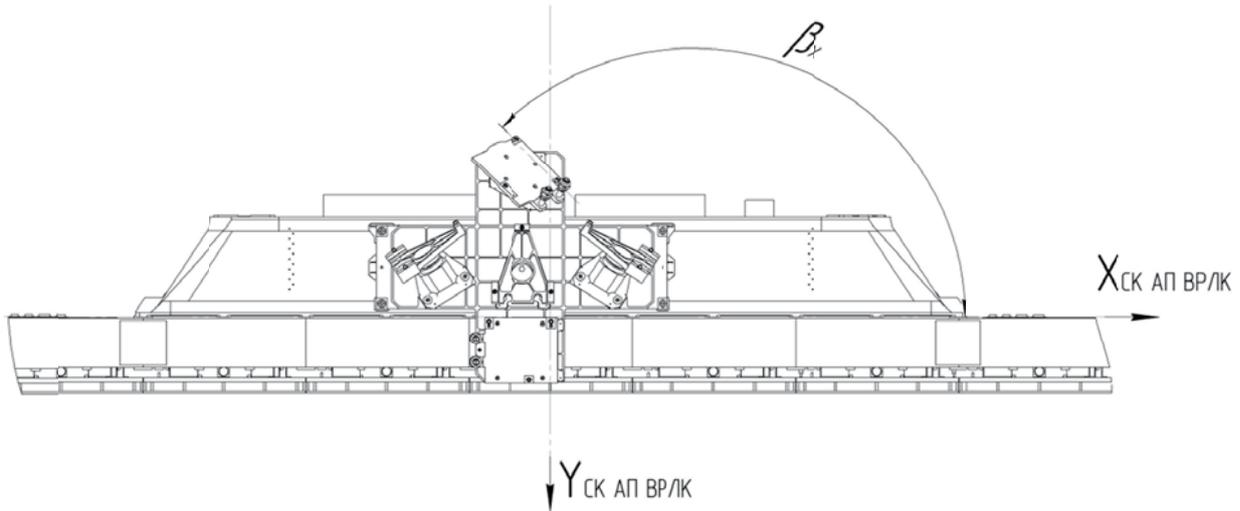


Рис. 5. Угол β для ЧЭ СУД

$$\Delta \bar{X} = t \times \frac{S}{\sqrt{n}},$$

где t – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности (P) и числа выполненных измерений (n). Значения приведены в табл. 1

Суммарная погрешность результатов измерений углового положения посадочных мест под приборы вычисляется по формуле:

$$\Delta \bar{A} = \sqrt{\Delta X^2 + \Theta_x^2},$$

где Θ_x – инструментальная погрешность измерений величины углового положения посадочных мест.

Предельная погрешность измерения координат определяется измерительной предельной погрешностью лазерного трекера АРІ, погрешностью установки отражателя, а также стабильностью конструкции и опоры. Погрешность измерений лазерным трекером составляет $\pm 0,005$ мм.

Предельная погрешность измерения вертикального и горизонтального угла лазерного трекера АРІ Tracker3, исходя из данных указанных производителем, составляет 0,7 угловой секунды (0,0002 град.), что в линейном выражении

составляет 0,0035 мм на метр расстояния между точкой пересечения вертикальной и горизонтальной оси вращения лазерного трекера и центром сферического отражателя.

Величины измеряемого углового положения площадок под приборы и оценка погрешности измерений (при доверительном интервале $P=0,997$, коэффициент Стьюдента равен 4,03) представлены в табл. 2.

Таким образом, суммарная погрешность измерений не превышает заданной.

ВЫВОДЫ

В данной работе приведены результаты создания методики определения с помощью лазерного трекера фактического углового положения посадочных мест под установку чувствительных элементов системы управления движением относительно системы координат радиолокатора. Выполнена задача обеспечения высокой точности измерений, произведена оценка погрешности измерений, исключена необходимость изготовления сложной технологической оснастки. Результаты измерений будут использованы в системе управления движением КА.

Таблица 1. Значения коэффициента Стьюдента

n	P			
	0,95	0,99	0,995	0,997
6	2,4460	3,7070	4,3160	5,40
7	2,3646	3,4995	4,2293	4,82
8	2,3060	3,3554	3,8320	4,46
9	2,2622	3,2498	3,6897	4,21
10	2,2281	3,1693	3,5814	4,03

Таблица 2. Величины измеряемого углового положения площадок под приборы

Угловое положение площадки	Среднее значение, Град.	Случайная погрешность, град.	Суммарная погрешность, град.	Суммарная погрешность, сек.
	\bar{X}	ΔX	ΔA	ΔA
α_z	61,656	0,0026	0,0027	9,7
β_z	62,365	0,0020	0,0021	7,56
α_x	26,256	0,0039	0,0040	14,4
β_x	134,663	0,0022	0,0023	8,3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

<ol style="list-style-type: none"> 1. Куренков, В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения [Текст]: учеб. пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, Б. А. Абрамов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. - 296 с. 2. Каракулев, Ю.А. Измерение отклонений от соосности деталей в регулировочных клапанах турбин [Текст] / Ю.А. Каракулев. // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2007. – №4. – С. 27 – 30.. 3. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [Текст] / А.Н. Кирилин, Г.П. Аншаков, Р.Н. Ахметов [и др.] // Самара: АГНИ, 2011. – 280 с. 4. Демкин, В.Н. Лазерные технологии при измерении геометрии поверхности сложной формы (обзор) [Текст] / В.Н. Демкин, В.Е. Привалов. // Вестн. СПбО АИН. Вып.5. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – С. 138 – 187. 5. Якунин, В.В. Системы лазерные координатно-измерительные API Tracker 3 [Текст] / В.В. Якунин, Д.Г. Викорук. // Вестн. Метролога. Вып. 2. - СПб, 2009. – С. 13 – 15. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kurenkov, V.I. Foundations of structure and simulation of designated operation of observational spacecraft [Text] / V.I. Kurenkov, V.V. Salmin, B.A. Abramov. – Samara: Publishers SSAU, 2007. - 296 p. 2. Karakulev, Y.A. Measurement of deviations from coaxiality of components in regulating valves of turbines [Text] / Y.A. Karakulev. // Izv. Vuzov. Priborostroenie. – 2007. - №4. – p. 27-30. 3. Space apparatus building: scientific-technical researches and practical creations of GNPRKC «CSKB-Progress» [Text] / A.N. Kirilin, G.P. Anshakov, R.N. Ahmetov [at alias] // Samara: AGNI, 2011. – 280 p. 4. Demkin, V.N. Laser technologies when measuring the geometry of irregular shape (Review) /V.N. Demkin, V.E. Privalov// Vestn. SPbO AIN. Publication 5. SPbGPU, 2008. P.138-187. 5. Yakunin, V.V. Laser coordinate measuring system API Tracker 3 [Text] / V.V. Yakunin, D.G. Vikoruk. // Vestn. Metrologa. Publication 2. – SPb, 2009. - p. 13 – 15.
---	---

GEOMETRICS CONTROL OF HIGH-ACCURACY BENCHES FOR TRAFFIC CONTROL SYSTEM'S DETECTING ELEMENTS OF SPACECRAFT

© 2018 S.N. Shaposhnikov, O.S. Efremkin

Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Samara

The paper covers the problem of geometrics control of high-accuracy benches for traffic control system's detecting elements of spacecraft by laser coordinate measuring system. Essential measuring facilities and their principles of operation are described. This research illustrates the advantages of laser measuring systems. General attention is given to problems of integration these systems in production. Measurement data are set out.

Keywords: spacecraft, geometrics control, detecting elements, high-precision measurements, laser coordinate measuring system.

Sergey Shaposhnikov, Leading Design Engineer.
 E-mail: serg9ff@mail.ru
 Oleg Efremkin, Chief of Precision Measurements Group.
 E-mail: olegef1@rambler.ru