

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 528.48

**КОНТУРНЫЕ ПОСТРОЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СООСНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Ю.И. Пимшин<sup>\*</sup>, С.М. Бурдаков<sup>\*</sup>, Г.А. Науменко<sup>\*\*</sup>, Ю.А. Псарёв<sup>\*\*</sup>**

*<sup>\*</sup> Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ),*

*<sup>\*\*</sup> Донской государственный технический университет (ДГТУ)*

В работе рассмотрены теоретические основы контроля соосности. При этом даны возможные принципы формирования референтных пространственных прямых и приведены технические решения, используемые при контроле соосности контурным способом. В том числе рассмотрены оптический, лазерный и дифракционный способы реализации референтных прямых. Даны точностные характеристики, полученные при реализации этих способов.

*Ключевые слова:* контрольные измерения, соосность, расположение, ошибка измерения, средство измерения.

Поступила в редакцию: 14.06.2018

Контурные построения являются одним из наиболее распространённых методов геодезического контроля геометрических параметров при монтаже технологического оборудования и машиностроительных изделий в области больших размеров [1].

К группе параметров расположения относятся: соосность, перпендикулярность, параллельность, симметричность, позиционное расположение, номинальный наклон.

Контроль соосности сводится к тому, что в некоторой пространственной системе координат задана референтная фигура в виде прямой; необходимо определить принадлежность частной оси, заданной, как правило, двумя конечными для неё точками, к данной прямой (рис.1) [2-10]. Контур в данной задаче, как правило, также задается двумя точками. Несосоосность исследуемого объекта характеризуют проекции на координатные плоскости линейной величины, расположенной по перпендикуляру от референтной прямой до текущей точки, задающей частную ось.

По условию задачи контроля соосности и референтная прямая задана двумя точками  $1(x_1, y_1, z_1)$  и  $2(x'_2, y'_2, z'_2)$ . Каноническое уравнение прямой, проходящей через две данные точки, имеет вид:

$$\frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y_i - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z_i - z_1}{z_2 - z_1} \quad (1)$$

Анализируя выражение (1), отметим, что для решения задачи контроля соосности необходимо, чтобы система координат *хуз* была материализована некоторым средством измерений. Тогда в этой системе координат выполняют измерения (определение) координат  $x_i, y_i, z_i$  текущей точки  $i$ , по которым вычисляется параметр несоосности  $\delta_i, h_i$ , тогда абсолютная величина несоосности определится согласно формуле:

$$\Delta_i = \sqrt{\delta_i^2 + h_i^2}, \tag{2}$$

где  $\Delta_i$  – абсолютная величина несоосности выверяемого объекта;

$\delta_i$  – проекция  $\Delta_i$  на координатную плоскость  $XOY$ ;

$h_i$  – проекция  $\Delta_i$  на координатную плоскость  $ZOY$ .

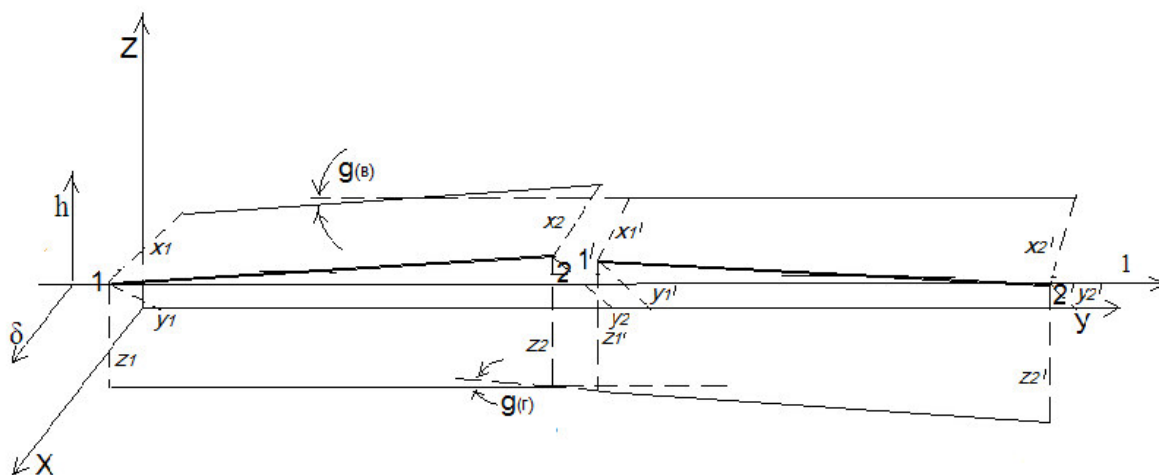


Рисунок 1 – Схема контроля соосности [Alignment control scheme]

При этом:

$$\delta_i = \frac{(x_2 - x_1) \cdot y_i - (y_2 - y_1) \cdot x_i + [(y_2 - y_1) \cdot x_1 - (x_2 - x_1) \cdot y_1]}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}, \tag{3}$$

$$h_i = \frac{(y_2 - y_1) \cdot z_i - (z_2 - z_1) \cdot y_i + [(z_2 - z_1) \cdot y_1 - (y_2 - y_1) \cdot z_1]}{\sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}. \tag{4}$$

Ориентирование системы координат средства измерений  $xuz$  в системе координат измеряемого объекта  $\delta lh$  характеризуют коэффициенты:

$$\hat{E}_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad \hat{E}_2 = \frac{z_2 - z_1}{y_2 - y_1}.$$

При  $K_1 \neq 0, K_2 \neq 0$  данное условие соответствует свободному ориентированию систем координат  $xuz$  и  $\delta lh$ , нестворность  $\Delta_i$  в этом случае определяется из выражений (3)-(4). Если  $K_1 = K_2 = 0$ , то это условие определяет случай строгого ориентирования систем координат  $xuz$  и  $\delta lh$  и в этом варианте нестворность вычисляется по формуле:

$$\delta_i = y_i - y_1, \quad h_i = z_i - z_1, \tag{5}$$

(при параллельном переносе осей координат  $xuz // \delta lh$  параметры  $y_1, z_1$  характеризуют величину смещения координат  $xuz$  относительно  $\delta lh$ ), и:

$$\delta_i = y_i, \quad h_i = z_i \tag{6}$$

(при совмещении осей координат  $xuz = \delta lh$ ).

Рассмотрим практические способы реализации формул (5-6). Геодезический контроль соосности, как правило, осуществляется методом, общая суть которого заключается в идее выполнения измерений от некоторой идеальной пространственной прямой, материализуемой в пределах контролируемого участка. Качественное многообразие принципов формирования референтных прямых можно классифицировать (табл. 1).

Таблица 1 – Принципы формирования референтных пространственных прямых [Principles of the formation of reference spatial lines]

РЕФЕРЕНТНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПРЯМЫЕ		
Принципы формирования		
механический	оптический	лучевой
струнно-механический	оптического визирования	лазерный
струнно-оптический	коллиматорный	интерференционный (дифракционный)
струнно-электронный	автоколлимационный	

Из таблицы следует, что контроль соосности осуществляется механическим, оптическим, лучевым методами. Нами исследованы два последних метода.

В настоящее время известно большое количество вариантов реализации оптического контроля соосности. Данное направление геодезических измерений постоянно совершенствуется, при этом разрабатываются программы, адаптированные на конкретные производственные условия. Авторами предложены способы измерений, основанные на построении референтных пространственных прямых, строго ориентированных в системе координат выверяемого объекта. Ниже приведем оптимальную программу, характеризующую данные решения.

### ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ

В процессе контроля соосности референтная пространственная прямая задается двумя точками 1, 2 (рис. 2), материализуется визирным лучом геодезического прибора (например, нивелир), который строго ориентируется в системе координат  $\delta lh$  выверяемого объекта (т.е.  $xuz \parallel \delta lh$ ). При этом может быть использован любой способ ориентирования системы координат средства измерений  $xuz$  в системе координат  $\delta lh$ . На выверяемые элементы конструкции (например, опорные части подшипников) устанавливаются две взаимно перпендикулярные линейки, причем так, чтобы одна линейка была горизонтальна, вторая вертикальна. Данную установку позволяет осуществить цилиндрический уровень, скрепленный с линейкой. Далее берут отсчеты  $a_i$ ,  $b_i$  по линейкам и вычисляют параметры несоосности по формулам:

$$\delta_i = a_i - a_0, \quad h_i = b_i - b_0, \quad (7)$$

где  $a_0, b_0$  – параметры строгого ориентирования системы координат  $xuz$  в системе  $\delta lh$ .

Средняя квадратическая ошибка определения  $\delta_i$  и  $h_i$  вычисляется по формуле:

$$m_{\delta_i}^2 = m_{a_i}^2 + m_{a_0}^2, \quad m_{h_i}^2 = m_{b_i}^2 + m_{b_0}^2, \quad (8)$$

где  $m_{a_i}$ ,  $m_{b_i}$  – средние квадратические ошибки отсчитывания по линейкам;

$m_{a_0}$ ,  $m_{b_0}$  – средние квадратические ошибки ориентирования системы координат  $xuz$  в  $\delta lh$ .

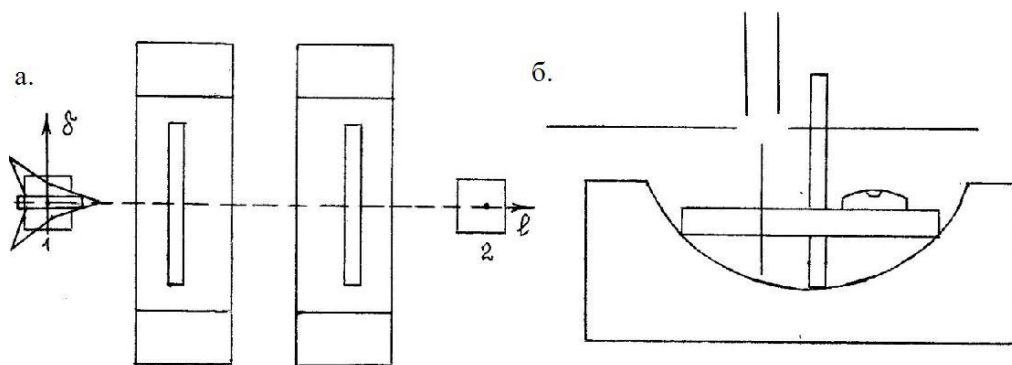


Рисунок 2 – Схема контроля соосности [Alignment control scheme]

Описанная методика контроля соосности была реализована при монтаже технологического мельничного оборудования (ММС и МШР) золото обогатительного комбината. Анализ результатов выполненных работ показал, что при использовании данной методики обеспечивается точность контроля, характеризуемая средними квадратическими ошибками, не превосходящими  $\pm 0.1$  мм.

### ЛУЧЕВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ

Авторами исследован способ контроля соосности с использованием лазерного указателя направлений. В этом случае референтная пространственная прямая материализуется осью симметрии сформированного лазерного пучка, который строго ориентирован в системе координат  $\delta lh$  выверяемого объекта (рис. 3).

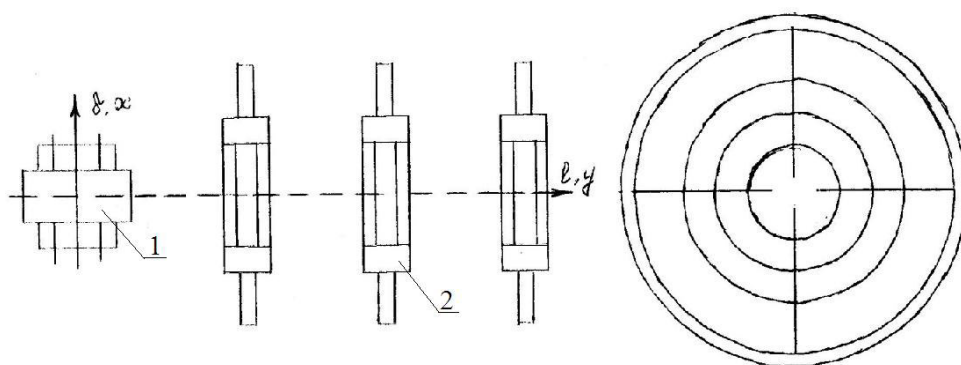


Рисунок 3 – Схема компоновки лазерной системы [Layout of laser system]

Ориентирование лазерного пучка может быть осуществлено следующим образом. При закреплении излучателя 1 совмещают его с начальной точкой контролируемой оси и проектируют луч на экран, расположенный на конечной (диаметральной) точке той же оси. Затем поворачивают источник на  $180^\circ$  относительно его продольной оси. При этом, в общем случае, лазерный луч будет проектироваться в другое место экрана (относительно первоначального положения). Юстировочными винтами крепления источника излучения перемещают пятно луча на половину линейной величины, заключенной между двумя проекциями этого луча. Повторив описанную операцию несколько раз, добиваются того, что при развороте источника на  $180^\circ$  его луч всегда проектируется в одну и ту же точку экрана. При этом обеспечивают строгое ориентирование системы координат  $xuz$  средства измерений в системе  $\delta lh$  выверяемого объекта, т.е.  $xuz = \delta lh$ .

На исследуемые точки устанавливают регистрационные устройства 2 (центроискатели), имеющие полупрозрачные экраны. Анализируя расположение

изображения источника излучения и биссектора экрана и совмещая их (используя микрометрические винты), берут отсчеты  $a_i$ ,  $b_i$ . Имея ввиду, что  $a_0$  и  $b_0$  равны 0 (выполнено строгое ориентирование с совмещением осей координат  $xuz = \delta lh$ ), то :

$$\delta_i = a_i, h_i = b_i. \quad (9)$$

Описанная методика может быть реализована дифракционным средством измерений, предложенным авторами. Данная система содержит источник света – лазер 1, светоприемник 2, спектральную марку, состоящую из зеркальных пластин 3 (рис. 4). На зеркальной поверхности последних нанесена непрозрачная зона 4. На обратной стороне пластины нанесен радиальный биссектор 5, в центре которого имеется прозрачная зона 6 в виде круга. Причем каждая последующая зеркальная пластина имеет радиус прозрачной зоны меньше, чем у предыдущего. При этом последняя зеркальная пластина не имеет прозрачной зоны. Каждая зеркальная пластина размещена в обойме 7, которая установлена при помощи микрометрических винтов 8 в центрирующее устройство 9.

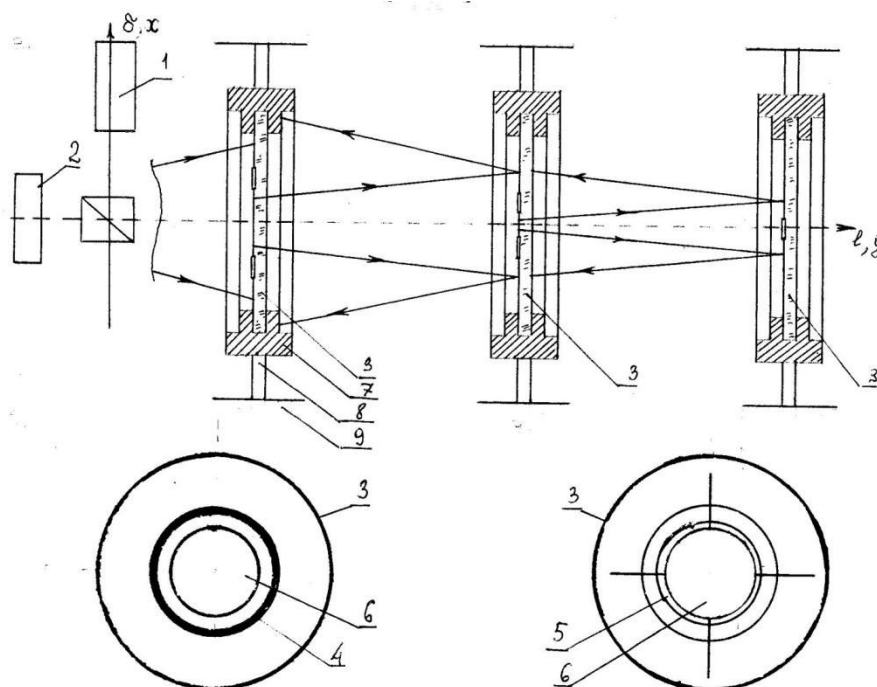


Рисунок 4 – Дифракционная система контроля соосности [Diffractional alignment system]

Дифракционная система работает следующим образом. Вдоль оси объекта ориентируется лазерный луч. С этим же направлением совпадает ориентировка светоприемника, связанного с лазером, например, полупрозрачным зеркалом. Зеркальные пластины устанавливают так, что ближайшая к приемопередатчику пластина имеет максимальный радиус прозрачной зоны, а последующие – постепенно уменьшаемые радиусы. Такое расположение зеркальных пластин позволяет получить многофункциональную спектральную марку.

Лазерный луч распространяется вдоль оси выверяемого объекта. При этом, попадая на первую зеркальную пластину, внешняя часть луча отразится от зеркальной пластины в обратном направлении и в плоскости экрана светоприемника сформирует интерференционную картину, которая будет задавать функцию первого контролируемого элемента объекта. Внутренняя часть луча пройдет через прозрачную зону пластины и попадет на последующую зеркальную пластину. Внутренняя часть

луча вновь пройдет через прозрачную зону, а внешняя отразится и вследствие дифракции сформирует кольцевую картину в плоскости радиального биссектора предыдущей пластины, тем самым задаст функцию взаимного положения элемента объекта предыдущей пластины. При этом некоторая внутренняя часть колец интерференционной картины попадет с обратной стороны в область прозрачной зоны предыдущей пластины и достигает экрана светоприемника, где соответственно будет задавать функцию второго элемента объекта. Каждая последующая зеркальная пластина формирует в плоскости радиального биссектора предыдущей пластины дифракционную картину. Этим она задает соответствующую функцию взаимного положения элементов объекта и формирует интерференционную картину в плоскости экрана светоприемника, где соответственно задает функцию элемента, в котором установлена зеркальная пластина относительно оси объекта. При несоосности элементов величины смещения их определяют из отсчетов по микрометрическим винтам, предварительно добившись соответствующим перемещением зеркальных пластин симметричного положения кольцевых интерференционных картин в плоскости радиального биссектора каждой зеркальной пластины.

Анализ результатов лабораторных исследований лазерных систем контроля соосности показал, что при их использовании обеспечивается точность контроля, характеризуемая средними квадратическими ошибками, не превосходящими  $\pm 0.03$  мм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пимшин, Ю. И.* Разработка теории и исследование методов контурных построений для геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования: дис. док. тех. наук [Текст] / Ю.И. Пимшин. – Москва, 1995. – 271 с.
2. *Ямбаев, Х.К.* О принципах и средствах формирования референтных контуров [Текст] / Х.К. Ямбаев, Ю.И. Пимшин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – Вып. 2-3. – 1994.
3. *Ямбаев, Х.К.* О принципах формирования и средствах реализации референтных прямых [Текст] / Х.К. Ямбаев, Ю.И. Пимшин // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – Вып. 6. – 1994.
4. *Пимшин, Ю.И.* Дифракционное устройство для измерения отклонений от заданной оси. А.с. № 1434257, G 01 C 15/00, опубл. 30.10.88, бюл. № 40.
5. *Пимшин, Ю.И.* Устройство для контроля прямолинейности и соосности. А.с. № 1402803, G 01 B 11/30, опубл. 15.06.88, бюл. № 22.
6. *Вагнер, Е.Т.* Лазерные и оптические методы в самолетостроении [Текст] / Е.Т. Вагнер, А.А. Митрофанов, В.И. Баюков. – Москва : Машиностроение, 1977. – 173 с.
7. *Виноградов, В.В.* Разработка и исследование методов геодезических измерений с применением рассеянного лазерного излучения: автореф. дис. канд. тех. наук по спец. 05.24.01 [Текст] / В.В. Виноградов. – Москва : МИИЗ, 1979. – 22 с.
8. *Жилкин, А.М.* Способ измерения прямолинейности и плоскостности. А.с. 615359, G 01 B 11/30, опубл. 04.03.78, бюл. 3.
9. *Зайков, В.И.* Метод контроля монтажа элементов крупногабаритных изделий с применением протяженных лазерных пучков интерференционной структуры: автореф. дис. канд. тех. наук [Текст] Ленинград : Сев.-зап. заочн. политех. ин-т, 1989. – 16 с.
10. *Мунир, Я.* Построение створа параллельно заданной плоскости. [Текст] / Я. Мунир // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – Вып. 4. – 1989. – С.44-51.

#### REFERENCES

- [1] Pimshin Y.I. Razrabotka teorii i issledovanie metodov konturnyh postroenij dlya geodezicheskogo obespecheniya montazha tekhnologicheskogo oborudovaniya [Development of the Theory and Research of Methods of Contour Buildings for Geodetic Support of Installation of Technological Equipment]. Moscow. Dissertation of Doctor of Technical Sciences. 1995. 271 p. (in Russian).
- [2] Yambayev H.K., Pimshin Y.I. O principah i sredstvakh formirovaniya referentnykh konturov [Principles and Means of Reference Contour Formation]. Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka News of Universities. Geodesy and Aerial Photography. Issue 2-3. 1994 (in Russian).

- [3] Yambaev H.K., Pimshin Y.I. O principah formirovaniya i sredstvakh realizacii referentnyh pryamyh [Principles of Formation and Means of Implementation of Reference Lines]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka* [News of Universities. Geodesy and Aerial Photography]. Issue 6. 1994 (in Russian).
- [4] Pimshin Y.I. Difrakcionnoe ustrojstvo dlya izmereniya otklonenij ot zadannoj osi [Diffraction Device for Measuring Deviations from Predetermined Axis]. A.S. № 1434257. G 01 C 15/00, publ.30.10.88, bul. No. 40 (in Russian).
- [5] Pimshin Y.I. Ustrojstvo dlya kontrolya pryamolinejnosti i soosnosti [Device for Straightness and Alignment Control]. A.S. № 1402803. G 01 in 11/30, publ. 15.06.88. Byul. 22 (in Russian).
- [6] Wagner E.T., Mitrofanov A.A., Baikov V.I. Lazernye i opticheskie metody v samoletostroenii [Laser and Optical Methods in Aircraft Construction]. Moskva. Mashinostroenie [Moscow. Mechanical Engineering]. 1977. 173 p. (in Russian).
- [7] Vinogradov V.V. Razrabotka i issledovanie metodov geodezicheskikh izmerenij s primeneniem rasseyanogo lazernogo izlucheniya [Development and Research of Geodetic Measurements Methods Using Scattered Laser Radiation]. Abstract of Ph. D. Thesis in Engineering. 05.24.01, Moskva : MIIZ [Abstract of Ph. D. Thesis in Engineering. 05.24.01, Moscow. MIEL]. 1979. 22 p. (in Russian).
- [8] Zhilkin A.M. Sposob izmereniya pryamolinejnosti i ploskostnosti [Method of measurement of straightness and flatness]. A.S. № 615359. G 01 in 11/30, publ. 04.03.78. Byul. 3. (in Russian).
- [9] Zaikov V.I. Metod kontrolya montazha elementov krupnogabaritnyh izdelij s primeneniem protyazhennykh lazernykh puchkov interferencionnoj struktury [Method of Control of Large-Size Product Element Installation with Use Long Laser Beams Interference Pattern]. Abstract of Ph. D. Thesis in Engineering. 1989. 16 p. (in Russian).
- [10] Munir Y. Postroenie stvora parallel'no zadannoj ploskosti [Construction of Target Parallel to the Given Plane]. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka* [News of Universities. Geodesy and Aerial Photography]. Issue 4. 1989. P. 44-51 (in Russian).

### Contour Buildings in the Control of Geometrical Parameters of the Alignment Elements of the Processing Equipment

**Yu.I. Pimshin\*<sup>1</sup>, S.M. Burdakov\*\*<sup>2</sup>, G.A. Naumenko\*\*<sup>3</sup>, Yu.A. Psarev\*\*<sup>4</sup>**

\**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia, 347360*

\*\* *Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000*

<sup>1</sup> *ORCID iD: 0000-0001-6610-8725*

*WoS Researcher ID: J-6791-2017*

*e-mail: YIPimshin@mephi.ru*

<sup>2</sup> *ORCID iD: 0000-0002-8599-6008*

*WoS Researcher ID: F-6903-2017*

*e-mail: SMBurdakov@mephi.ru*

<sup>3</sup> *ORCID iD: 0000-0002-7512-4687*

*WoS Researcher ID: J-7170-2017*

*e-mail: geodez@aanet.ru*

<sup>4</sup> *ORCID iD: 0000-0002-8609-3687*

*WoS Researcher ID: P-2357-20*

*e-mail: psarev161@gmail.com*

**Abstract** – The paper considers theoretical foundations of the coaxiality control. It gives possible principles of the formation of reference spatial lines and the technical solutions used to control coaxiality in a contour method. Optical, laser and diffraction methods of the reference line implementation are review. Accuracy characteristics obtained after using these methods are presented.

**Keywords:** measurement, coaxial alignment, positioning, measurement error, measurement tool.