

## МНОГОПОЗИЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КРУПНОГАБАРИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2023

**Н. А. Сазонникова** доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru)

**Р. В. Уклеин** аспирант кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; [romanfonuklein@yandex.ru](mailto:romanfonuklein@yandex.ru)

Контроль геометрических параметров изделий аэрокосмической техники на разных стадиях изготовления и оценка их соответствия требованиям конструкторской документации является одной из важнейших задач производства. Использование лазерных автоматизированных измерительных систем измерительных средств позволяет повысить скорость проводимых измерений и использовать в качестве эталона цифровую модель изделия. В работе рассматривается двухпозиционный контроль бака одного из компонентов топлива проектируемой ракеты-носителя, изготовленного из сплава АМг-6. Контроль геометрических параметров проводится при двух режимах статического нагружения. При этом погрешность определения линейных размеров не должна превышать 150 мкм. Построена математическая модель измерительной системы многопозиционного контроля и получены уравнения для оценки неопределённости измерений при многопозиционном контроле. Значение функции ошибок, представляющей собой разницу ошибок определения координат опорных точек и контролируемых точек объекта измерений, должно быть минимальным. Математическая модель в дальнейшем использована для проведения численного моделирования, которое позволит выбрать оптимальную конфигурацию измерительной системы многопозиционного контроля для оценки геометрических параметров бака в процессе нагружения

*Лазерный трекер; многопозиционный контроль; система опорных точек; оптимальная конфигурация; матрица трансформации*

---

**Цитирование:** Сазонникова Н.А., Уклеин Р.В. Многопозиционный контроль с помощью лазерного трекера перемещений элементов крупногабаритной конструкции в процессе статического нагружения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 2. С. 91-104. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-91-104

### Введение

Контроль геометрических параметров изделий аэрокосмической техники на разных стадиях изготовления и оценка их соответствия требованиям конструкторской документации являются одной из важнейших задач производства. Возможности проведения контроля в значительной степени зависят от применяемых средств измерений, их точности и уровня автоматизации. Одной из наиболее важных задач при сборке крупногабаритных изделий является контроль деформаций элементов конструкций при разных видах нагружений в статическом и динамическом режимах.

Анализ существующих методов измерений показал, что контроль геометрии крупногабаритных изделий осуществляется как с применением специальных шаблонов, так и посредством лазерных измерительных систем.

Контроль геометрии крупногабаритных частей деталей и сборок, который проводят с помощью шаблонов, занимает значительную часть в измерениях в авиационной и космической отраслях. 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. Данная технология также не позволяет в полной мере оценить величину отклонения от требований, определенных в конструкторской документации. При каких-либо доработках в конструкции изделия необходимо заменять шаблон. Использование лазерных измерительных систем позволяет проводить бесконтактные измерения для крупногабаритных изделий любой формы на различных этапах технологического процесса и оценить реальные значения геометрических параметров изделий.

Наилучшие результаты при решении таких задач могут быть получены при использовании лазерных автоматизированных измерительных систем, таких как лазерные сканеры и лазерные трекеры. Использование таких измерительных средств позволяет повысить скорость проводимых измерений и использовать в качестве эталона цифровую модель изделия.

Лазерный трекер представляет собой следящую измерительную систему. Он позволяет определить пространственное положение точки, заданной отражателем, в сферической системе координат. В том случае, если невозможно провести контроль геометрии крупногабаритного изделия с помощью одного лазерного трекера, используются несколько лазерных трекеров одновременно или последовательно проводится контроль при измерениях одним лазерным трекером с нескольких стоянок. Такая методика получила название многопозиционного контроля. Однако в этих случаях возникает проблема привязки двух или более систем координат независимых измерений. Преобразование измеренных параметров из систем координат стоянок лазерного трекера в систему координат контролируемого объекта (сборки) осуществляется с помощью матрицы трансформации.

При однопозиционном контроле на точность определения дальности и угловых координат как в режиме интерферометра, так и в режиме абсолютного дальномера существенное влияние оказывает расстояние от измерительной головки лазерного трекера до отражателя. Существенными факторами также являются вид отражателя, точность его установки, расположение отражателей на контролируемом объекте, а также характеристики окружающей среды (температура, влажность), влияние которых учитывает встроенная метеостанция. Погрешность оценки геометрических параметров объекта также зависит от выбранных видов адаптеров и кронштейнов для крепления отражателей [1 – 3].

Системы многопозиционного контроля широко применяются при сборке летательных аппаратов [1]. При этом коэффициенты чувствительности трансформационной матрицы учитывают поворот и сдвиг системы координат, а неопределённость измерений всей системы зависит от конфигурации опорной сети. Значение этих коэффициентов резко падает с увеличением расстояния от трекера до опорной точки. Наилучшая точность измерения дальности трекером достигается в диапазоне углов  $\pm 20^\circ$ .

Точность определения координат заданных точек при многопозиционном контроле зависит от ряда факторов. Наиболее существенными являются расположение стоянок лазерного трекера и опорных точек, которые вносят существенный вклад в трансформационную матрицу [1]. Большую роль также играет выбор системы координат измерительной системы и контролируемого объекта, а также способа привязки между ними [2].

Оптимизация многопозиционной измерительной системы может осуществляться за счёт выбора расположения стоянок трекера [2]. При этом расположение стоянок лазерного трекера оказывает существенное влияние на точность определения координат при многопозиционном контроле.

При разработке системы многопозиционного контроля для уменьшения числа неизвестных в математической модели измерительной системы за начало системы координат измерительной системы принимаются координаты первой стоянки трекера. В работе [2] представлена математическая модель, позволяющая оценить погрешность определения координат при многопозиционном контроле. Оптимальным является такое расположение лазерного трекера, при котором все контролируемые точки находятся в поле его зрения при минимально возможном его удалении от объекта контроля. При этом погрешность измерения дальности зависит от режима измерений лазерного трекера (режим абсолютного дальномера (ADM) и интерферометра (IFM)). Применение метода последовательного многопозиционного контроля позволяет снизить погрешность определения координат в 2-3 раза по сравнению с однопозиционным контролем.

На точность определения геометрических параметров объекта также оказывают влияние расположение отражателей и конструкция кронштейнов [3]. В данной работе проводилась оценка неопределённостей измерения, связанных с влиянием расположения отражателей и кронштейнов. Выявлено, что погрешность вдоль оси излучения отличается от погрешности по двум другим координатам.

Большую роль при разработке системы многопозиционного контроля играет способ привязки систем координат лазерных трекеров. Авторами работы [4] введено понятие самокалибровки измерительной системы. Оно предполагает минимальную разницу между номинальным и измеренным значением расстояния от трекера до отражателя. Координаты каждого отражателя должны быть измерены минимум тремя лазерными трекерами. Дальнейшее развитие метод самокалибровки применительно к выбору наилучшей конфигурации системы многопозиционного контроля получил в работе [5], в которой авторы рассматривали минимизацию неопределённости измерений, связанной с расположением стоянок трекера и числом стоянок. Основной целью данной работы является выбор наилучшей конфигурации измерительной системы. Показано, что точность определения координат возрастает с увеличением числа стоянок трекера. В данной работе выбраны оптимальные конфигурации для систем с 4-мя, 5-ю и 6-ю стоянками и определено требуемое число измеряемых точек для самокалибровки измерительной системы.

Для уменьшения чувствительности системы многопозиционного контроля к системе опорных точек целесообразно вводить обобщённую систему координат [6]. Здесь рассматривается привязка систем координат различных стоянок лазерных трекеров и минимизация неопределённостей измерений при обобщённой системе координат.

В работах [7 – 9] введены два вида коэффициентов, учитывающие соотношение между радиальной и угловой погрешностью лазерного трекера, а также угол расположения трекера. Во всех случаях для определения случайной составляющей неопределённости измерений и оптимизации измерительной системы целесообразно использовать численное моделирование в соответствии с руководством по выражению неопределённости измерений [10; 11].

При многопозиционном контроле процесс привязки систем координат стоянок лазерных трекеров осуществляется в программном пакете «Spatial Analyzer» с использованием модуля «Unified Spatial Metrology Network» (USMN). Модуль «Measurement Simulation» позволяет провести предварительное моделирование измерительной сети и исследование влияния расстояния от лазерного трекера до объекта измерений на параметры эллипсоидов погрешностей при производстве геодезических измерений лазерными трекерами API Radian и Leica 400-й серии [9]. Так как программный пакет «Spatial Analyzer» работает в предположении равенства погрешностей измерений по трём координатным осям, при обработке полученных результатов необходима коррекция погрешностей. В работе [9] разработан алгоритм вычисления оптимальных параметров

(углов и расстояний от инструмента до отражателя) при работе с лазерными трекерами с учётом заданного допуска и радиуса проектной кольцевой оси.

Алгоритм USMN целесообразно использовать совместно с имитационным моделированием методом Монте-Карло для оценки неопределённости измерений при многопозиционном контроле [12].

### **Задачи исследования**

Целью данной работы являлась разработка системы двухпозиционного контроля геометрических параметров бака одного из компонентов топлива проектируемой ракеты-носителя, изготовленного из сплава АМг-6 для определения поля перемещений, возникающих при статическом нагружении. Габариты бака составляют в длину 13560 мм и в диаметре 4100 мм. В ходе проведения измерений необходимо оценить величины абсолютных перемещений 20-ти точек, расположенных в двух сечениях контролируемого объекта. При этом погрешность трёхкоординатных измерений не должна превышать 100 мкм.

В представленном случае рабочие габариты испытываемого изделия не позволяли провести измерения с одной стоянки лазерного трекера. Для решения задачи измерения было предложено применение схемы двухпозиционного контроля. Необходимо отметить, что при составлении данной схемы взаимное расположение отражателей опорной системы точек было выбрано таким образом, чтобы каждая точка обозревалась с любой предполагаемой стоянки трекера. Также было учтено, что при многопозиционном контроле на точность определения дальности и угловых координат – как в режиме интерферометра, так и в режиме абсолютного дальномера – существенное влияние оказывают расстояние от измерительной головки лазерного трекера до отражателя и их взаимное расположение относительно объекта испытаний.

Объект измерений (рис. 1) представляет собой крупногабаритную цилиндрическую оболочку, установленную на ложементы и жёстко закреплённую в районах опор установки ложементов при помощи гибких элементов. В конструкции закрепления предусмотрены механизмы, создающие статическую нагрузку по направлению от теоретической оси объекта к «полу». Таким статическим нагружением имитируются условия транспортировки объекта на место проведения испытаний. В ходе измерения перемещений была создана схема измерения, предусматривающая установку в опорах объекта испытаний 20 сферических отражателей диаметром 12,7 мм (рис. 2) и опорной сети для локализации положения трекера, состоящей из 6 сферических отражателей диаметром 38,1 мм.

К измерительной системе предъявляются следующие требования по точности: погрешность измерения контрольных точек не более 150 мкм, погрешность, связанная с локализацией измерительной системы, – не более 50 мкм. Исходя из заданных требований для работы выбрана измерительная система на базе лазерного трекера API Radian. Пространственная погрешность его измерений составляет  $10 \text{ мкм} + 5 \text{ мкм/м}$  [13]. То есть на предполагаемом расстоянии в 5 м минимальная погрешность измерений составит порядка 35 мкм. Это означает, что для того, чтобы обеспечить требуемую точность, неопределённость измерений должна составлять не более 115 мкм.

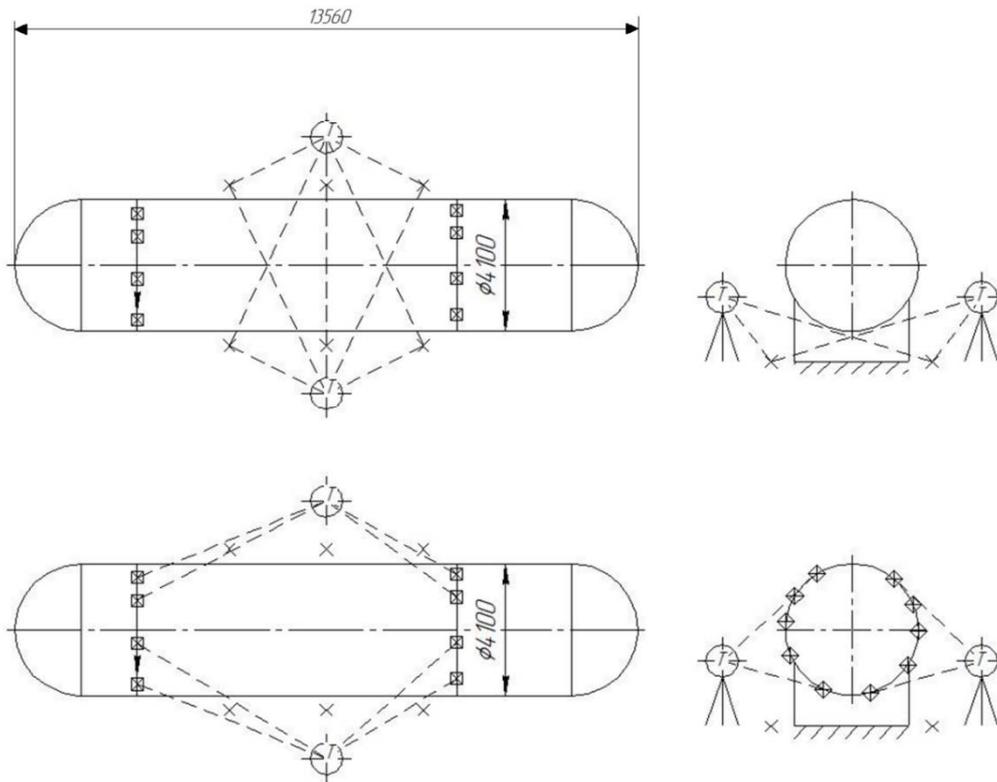


Рис. 1. Схематическое отображение объекта измерений, установки опорной сети и отражателей

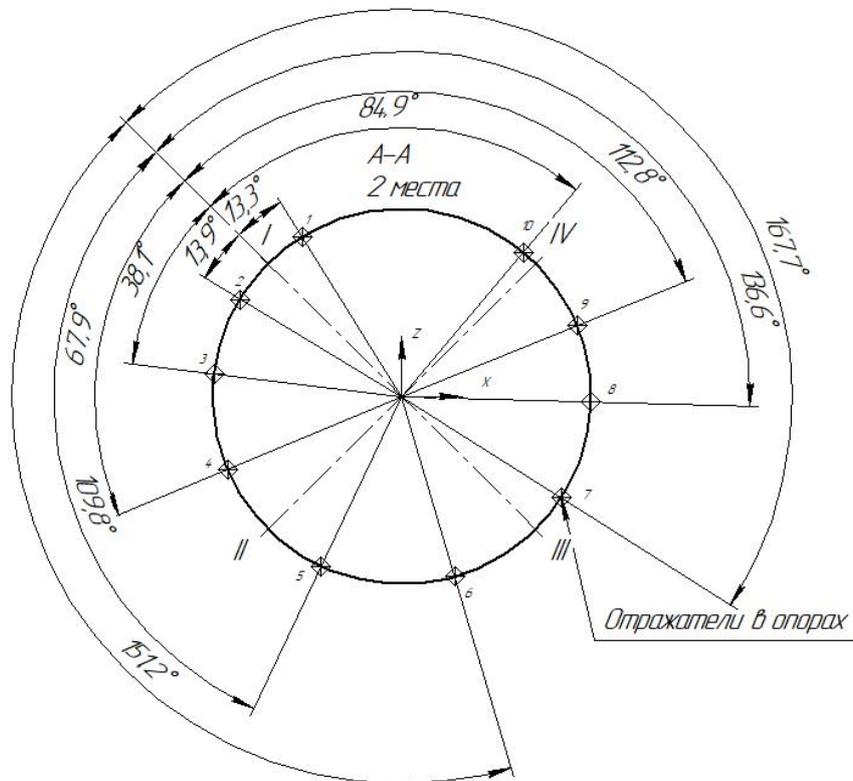


Рис. 2. Расположение отражателей в сечении бака

### Математическая модель измерительной системы

Для оценки взаимосвязи параметров измерительной системы и их влияния на точность измерений необходимо построить математическую модель данной измерительной системы. Так как данный вариант измерительной системы не реализует принцип мультилатерации (не для всех контролируемых точек может быть измерены координаты с двух стоянок трекера), то данная модель будет определять взаимосвязь между параметрами измерительной системы и их влияние на точность измерений. Схема измерительной системы поясняется на рис. 3:  $R_1, R_2, \dots, R_6$  – опорные точки;  $S_1, S_2$  – стоянки лазерного трекера.

Стоянки трекеров имеют следующие координаты:

$$\begin{aligned} S_1 & (x_2; y_{s1}; z_{s1}), \\ S_2 & (x_2; y_{s2}; z_{s1}). \end{aligned}$$

Опорные точки имеют координаты:

$$\begin{aligned} R_1 & (0; 0; 0), \\ R_2 & (x_2; 0; 0), \\ R_3 & (x_3; 0; 0), \\ R_4 & (0; y_4; 0), \\ R_5 & (x_2; y_4; 0), \\ R_6 & (x_3; y_4; 0). \end{aligned}$$

Для минимизации ошибки измерений, связанной с расположением опорных точек, была выбрана система координат, начало которой проходит через опорную точку  $R_1$ .

Для того, чтобы проводить оценку перемещений контролируемых точек в процессе нагружений, необходимо привести результаты измерений двух лазерных трекеров в общую систему координат с учётом матрицы сдвига:

$$X = T x', \tag{1}$$

где  $T_i$  – матрица сдвига, определяющая соотношение между обобщённой системой координат и  $i$ -й стоянкой лазерного трекера;  $X_i$  – координаты контролируемой точки в обобщённой системе координат;  $x_i$  – координаты контролируемой точки в системе координат  $i$ -го лазерного трекера.

При построении математической модели будем считать, что при преобразовании систем координат происходит только сдвиг, но нет поворота осей:

$$T_{\text{сдв}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – величины смещений между двумя системами координат по осям  $x, y$  и  $z$  соответственно. В свою очередь, эти величины можно записать в виде выражения:

$$\begin{cases} \Delta x = x_i - x_0, \\ \Delta y = y_i - y_0, \\ \Delta z = z_i - z_0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты текущего положения трекера;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты начала системы координат, соответствующие первой опорной точке (рис. 3).

Исходя из вышеуказанного, уравнение (1) для двух стоянок трекера можно записать следующим образом:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_1 - x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_1 - y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_1 - z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_2 - x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_2 - y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_2 - z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

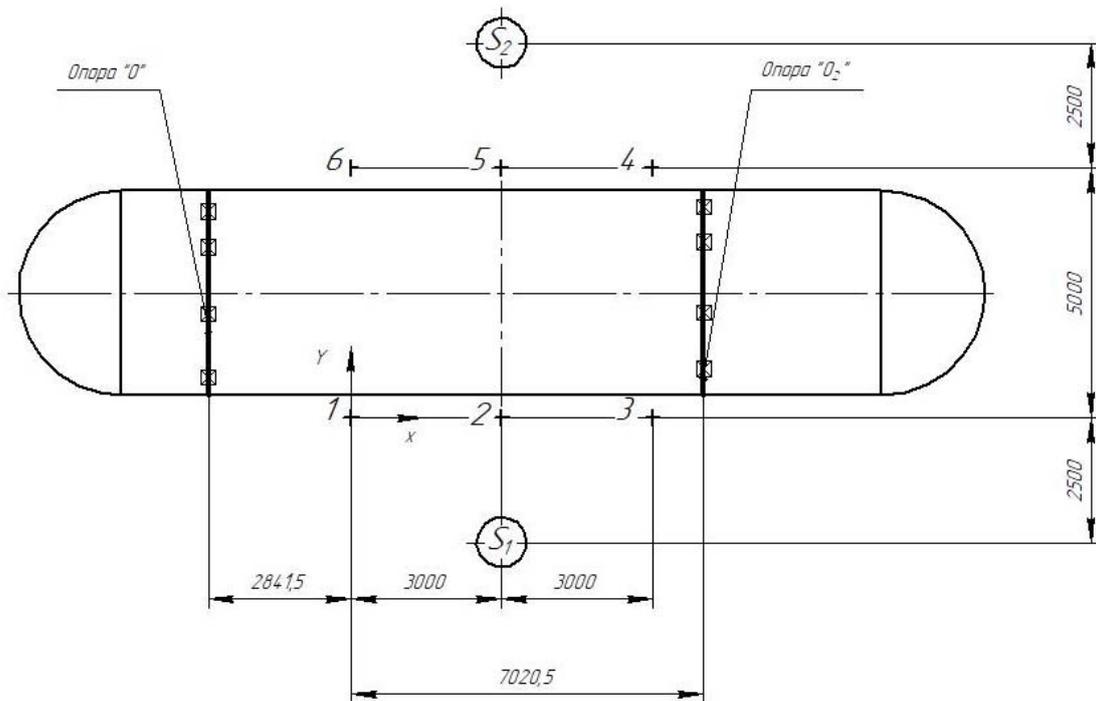


Рис. 3. Схема измерительной системы

Основываясь на уравнении, определяющем расстояние между двумя точками по определённым координатам [14], можно записать следующие уравнения, определяющие расстояния между стоянками трекера  $S_1, S_2$  и опорной точкой  $R_1$ , соответствующей началу выбранной системы координат:

$$\begin{aligned} L_{S_1} &= \sqrt{x_2^2 + y_{S_1}^2 + z_{S_1}^2}; \\ L_{S_2} &= \sqrt{x_2^2 + y_{S_2}^2 + z_{S_1}^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Расстояние между трекером  $S_1$  и опорными точками определяется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} L_{R2} &= \sqrt{y_{S_1}^2 + z_{S_1}^2}, \\ L_{R3} &= \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + y_{S_1}^2 + z_{S_1}^2}, \\ L_{R4} &= \sqrt{x_2^2 + (y_{S_1} - y_4)^2 + z_{S_1}^2}, \\ L_{R5} &= \sqrt{(y_{S_1} - y_4)^2 + z_{S_1}^2}, \\ L_{R6} &= \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_{S_1} - y_4)^2 + z_{S_1}^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Расстояние между трекером  $S_1$  и контролируемыми точками  $j$  на объекте:

$$L_{S_1j} = \sqrt{(x_2 - x_j)^2 + (y_{S_1} - y_j)^2 + (z_{S_1} - z_j)^2}, \quad (7)$$

где  $j$  – номер контролируемой точки.

В предлагаемой математической модели ошибка определения координат измеряемых точек будет в существенной степени определяться ошибкой привязки систем координат.

Величина ошибки определения расстояния между опорными точками и стоянками лазерного трекера определяется зависимостью:

$$f_{Rk} = \sqrt{(x_{S_1} - x_k)^2 + (y_{S_1} - y_k)^2 + (z_{S_1} - z_k)^2} - L_{Rk}, \quad (8)$$

где  $k$  – номер опорной точки,  $k = 1, 2, \dots, 6$ .

Точность привязки будет определяться величиной ошибки  $f_{Rk}$  (8).

Таким образом, построена математическая модель измерительной системы многопозиционного контроля и получены уравнения для оценки неопределённости измерений при многопозиционном контроле. Данная математическая модель включает в себя систему уравнений, определяющих расстояния между стоянками трекера, контролируемыми точками объекта измерений и точками опорной сети, а также трансформационную матрицу, определяющую соотношения между системами координат стоянок трекера и системой координат контролируемого бака. При этом значение функции ошибок, представляющей собой разницу ошибок определения координат

опорных точек и контролируемых точек объекта измерений, должно быть минимальным. Данная модель будет в дальнейшем использована для проведения численного моделирования неопределённости измерений в зависимости от параметров измерительной системы, что позволит выбрать оптимальную конфигурацию измерительной системы многопозиционного контроля для оценки геометрических параметров бака в процессе нагружения, соответствующую минимальному значению неопределённости измерения координат контролируемых точек поверхности бака.

Контроль геометрических параметров проводится при двух режимах статического нагружения, соответствующих транспортировке бака в составе ступени и транспортировке только бака. При этом погрешность определения линейных размеров не должна превышать 150 мкм.

### Методика проведения измерений

Блок-схема методики представлена на рис. 4. Объект измерений устанавливается на ложементы, далее на нём устанавливаются гидравлические элементы, создающие постепенную нагрузку. Для опоры  $O$  максимальная нагрузка составляет 204,3 кН, для опоры  $O_2$  181,9 кН. Затем монтируется система измерений: на полу возле бака устанавливается опорная сеть из шести сферических отражателей диаметром 38,1 мм по три с каждой стороны бака. В зоне опор радиально устанавливаются по 10 отражателей радиусом 12,7 мм и два лазерных трекера, как указано на рис. 3.

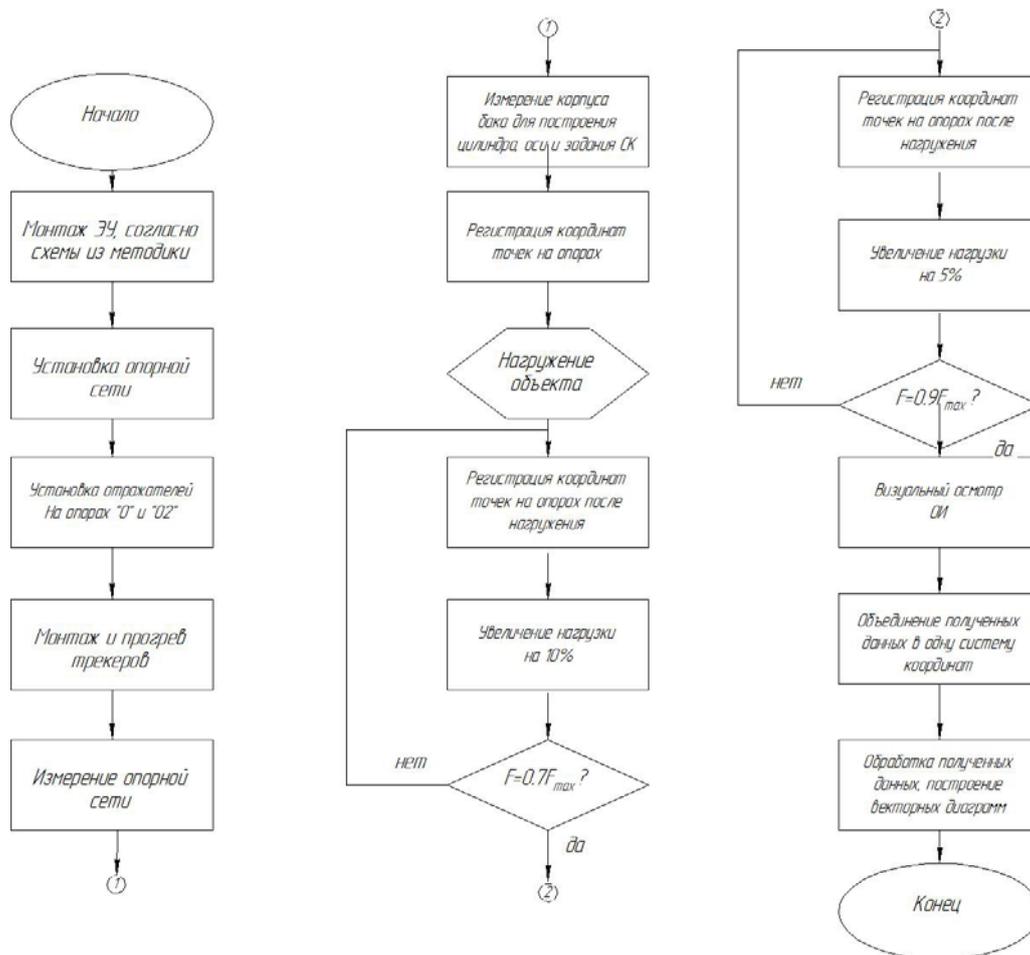


Рис. 4. Блок-схема методики проведения обмеров

После монтажа измерительной системы и прогрева трекеров производится обмер точек опорной сети с обеих стоянок и первичный обмер контрольных точек на опорах. С целью минимизации возможной ошибки измерений каждая контрольная точка обмеряется по 5 раз с целью получения «усреднённого» значения. В ходе испытаний на первом этапе нагружений производится увеличение нагрузки на каждой опоре одновременно на 10% от максимальной до достижения показателя в 70% включительно. Аналогичным образом показания после каждого увеличения нагрузки снимаются пятикратно. На втором этапе производится нагружение от 70 до 90% включительно с интервалом каждые 5%. По достижении 90% нагрузки с объекта нагружения снимается нагрузка. После цикла нагружений проводится визуальный контроль объекта на наличие дефектов конструкции. Результаты проведённых измерений при помощи измеренных заранее точек опорной сети объединяются в одну систему координат и отображаются в виде числовых массивов данных и графического отображения в виде векторов отклонений для большей наглядности. Собранные данные для удобства были объединены в виде графиков.

### Результаты измерений

Пример результатов измерений одного из режимов нагружения бака представлен в виде графика на рис. 5. Суммарная неопределённость 3D-измерений для отдельно взятой точки по результатам расчётов с использованием программного пакета Spatial Analyzer не превысила 100 мкм. Однако часть этой неопределённости измерений не всегда бывает возможно учесть в рамках аналитического расчёта ввиду случайного характера ошибок определения координат лазерным трекером, а также влияния на неопределённость определения координат контролируемых точек таких факторов, как преломление лазерного луча или температурного градиента объекта измерений. Максимальная неопределённость измерений, рассчитанная с помощью программного пакета Spatial Analyzer по результатам проведённых измерений составляет не более 75 мкм.

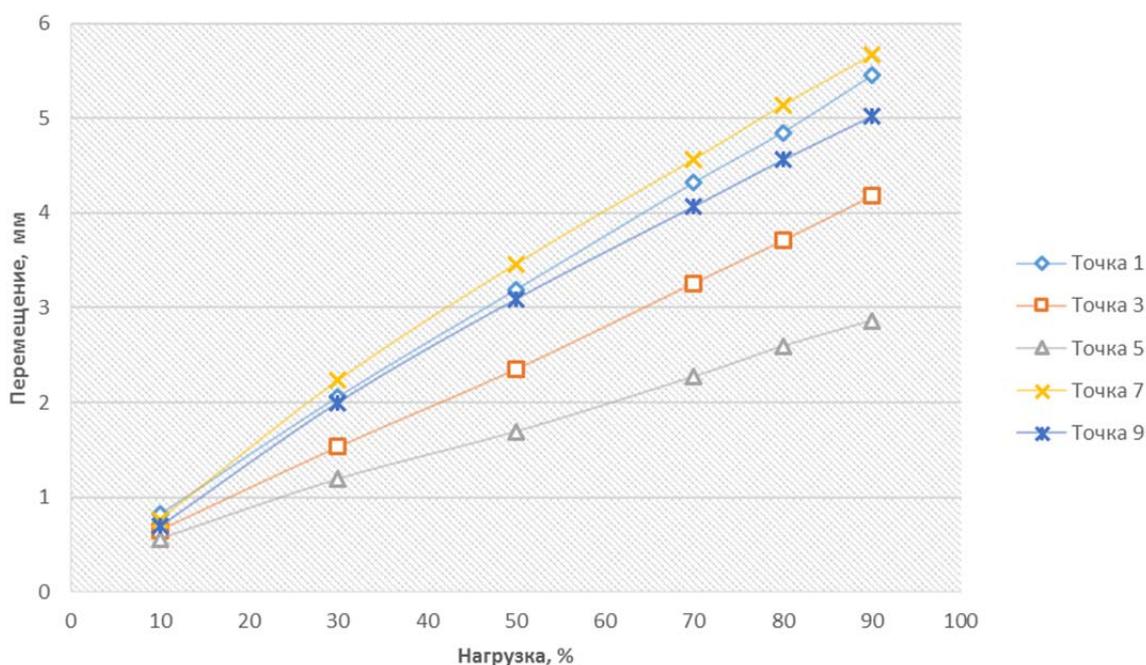


Рис. 5. Зависимости перемещений от нагружения на опоре  $O_2$  (в процентах от максимальной нагрузки на опоре)

Оценка проводилась методом опроса сигнала, отражённого от сферического отражателя с частотой 100 Гц, на протяжении одной секунды и автоматизированного определения среднеквадратичного отклонения на основании полученных данных. Значения отклонений выводились на экран после каждого измерения каждой точки. В качестве максимальной неопределённости измерения координат измерения точек принималось максимальное значение, которое было получено в ходе регистрации показаний. Неопределённость, связанная с локализацией лазерного трекера, определяется как модуль вектора каждой вновь измеряемой точки опорной сети относительно самого первого обмера точек опорной сети. На данном этапе определялась неопределённость привязки стоянок лазерного трекера. Неопределённость измерения координат опорных точек определялась аналогично методом опроса. Наибольшее значение модуля вектора, образованного между координатами первого обмера и последующих, принимается за максимальную неопределённость измерений, связанную с локализацией лазерного трекера. При расчётах неопределённости измерений использовалась стандартная методика. Максимальная неопределённость, связанная с локализацией лазерного трекера, составила не более 20 мкм, что соответствует заданным требованиям по точности проведения измерений. Дальнейшие улучшения данных показателей возможно получить, применяя схему мультилатерации за счёт исключения составляющей погрешности, связанной с определением угловых координат.

### Заключение

Статические испытания являются одним из наиболее важных этапов экспериментальной отработки изделий. Традиционные схемы измерений перемещений, как правило, позволяют определить их с достаточной точностью, но являются довольно трудоёмкими в плане подготовительного процесса. Для упрощения получения результатов в данной статье была предложена схема измерений перемещений при помощи лазерного трекера. В ходе работы была разработана математическая модель системы измерений, учитывающая расположение стоянок трекера, опорных точек и контролируемых точек на баке. На основе математической модели был предложен алгоритм проведения измерений при испытаниях и произведены расчёты погрешностей. Реализация предложенной схемы позволяет обеспечить требуемую точность измерений.

Предложенная методика измерения перемещений при статических испытаниях крупногабаритных изделий позволяет оперативно получать необходимую информацию практически в «полевых условиях» т.е. без проведения большого объёма подготовительных операций по монтажу схемы испытаний в специальном стапеле. При этом снижается длительность и трудоёмкость работ, а также значительно уменьшается объём изготавливаемой испытательной оснастки и количество используемых линейных датчиков перемещений.

### Библиографический список

1. Jin Z., Yu C., Li J., Ke Y. Configuration analysis of the ERS points in large-volume metrology system // *Sensors*. 2015. V. 15, Iss. 9. P. 24397-24408. DOI: 10.3390/s150924397
2. Wang H., Shao Z., Fan Z., Han Z. Configuration optimization of laser tracker stations for position measurement in error identification of heavy-duty machine tools // *Measurement Science and Technology*. 2019. V. 30, Iss. 4. DOI: 10.1088/1361-6501/ab048b
3. Muelaner J.E., Wang Z., Keogh P.S., Brownell J., Fisher D. Uncertainty of measurement for large product verification: evaluation of large aero gas turbine engine

datums // Measurement Science and Technology. 2016. V. 27, Iss. 11. DOI: 10.1088/0957-0233/27/11/115003

4. Takatsuji T., Goto M., Kirita A., Kurosawa T., Tanimura Y. The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration // Measurement Science and Technology. 2000. V. 11, Iss. 5. P. 477-483. DOI: 10.1088/0957-0233/11/5/305

5. Zhang D., Roltand S., Maropoulos P. Modelling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications // Measurement Science and Technology. 2005. V. 16, Iss. 12. P. 2541-2547. DOI: 10.1088/0957-0233/16/12/020

6. Gai Y., Zhang J., Guo J., Shi X., Wu D., Chen K. Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly // Measurement. 2020. V. 165. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108144

7. Aguado S., Santolaria J., David Samper D., Aguilar J.J. Forecasting method in multilateration accuracy based on laser tracker measurement // Measurement Science and Technology. 2017. V. 28, Iss. 2. DOI: 10.1088/1361-6501/aa5073

8. Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D. Laser trackers for large scale dimensional metrology: A review // Precision Engineering. 2016. V. 44. P. 13-28. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.12.001

9. Сердаков Л.Е. Разработка методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения. Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2020. 117 с.

10. JCGM 100: 2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM, 2008. 120 p.

11. Zhu X., Zheng L., Tang X. Configuration optimization of laser tracker stations for large-scale components in non-uniform temperature field using Monte-Carlo method // Procedia CHIRP. 2016. V. 56. P. 261-266. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.078

12. Aguado S., Santolaria J., Samper D., Aguilar J.J. Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification // Precision Engineering. 2013. V. 37, Iss. 4. P. 929-943. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.03.006

13. Лазерные трекееры API Radian. [https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2021/10/radian\\_web-postranichno-10\\_08\\_20.pdf](https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2021/10/radian_web-postranichno-10_08_20.pdf)

14. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

## **MULTI-POSITION CONTROL OF MOVEMENTS OF LARGE-SIZED STRUCTURAL ELEMENTS DURING STATIC LOADING USING A LASER TRACKER**

© 2023

**N. A. Sazonnikova** Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [nasazonnikova@yandex.ru](mailto:nasazonnikova@yandex.ru)

**R. V. Uklein** Postgraduate Student of the Department of Power Plant Automatic Systems; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [romanfonuklein@yandex.ru](mailto:romanfonuklein@yandex.ru)

One of the most important tasks in the manufacturing of aerospace products is the control of their geometric parameters at various stages of production and assessment of their compliance with the requirements of design documentation. The use of laser automated measuring systems makes it possible to increase the measurement speed and to use the product digital model as a reference point. The best results in solving such problems can be obtained using laser automated measuring systems, such as laser scanners and laser trackers. In this paper a two-position measurement system is applied to control the aluminum alloy fuel component tank of the designed launch vehicle with two modes of static loading, corresponding to different transportation conditions. In this case, the linear dimension error should not exceed 150  $\mu\text{m}$ . A mathematical model of a multi-position measuring system is constructed and measurement uncertainty equations are obtained. In this case, the error function value that represents the difference between the errors in determining the coordinates of the reference points and the controlled points of the measurement object should be minimal. This mathematical model will be further used for numerical modeling that will allow selecting the optimal configuration of a measuring system for multi-position control of the tank geometric parameters in the static loading process.

*Laser tracker; multi-position control; reference point system; optimal configuration; transformation matrix*

---

*Citation:* Sazonnikova N.A., Uklein R.V. Multi-position control of movements of large-sized structural elements during static loading using a laser tracker. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 2. P. 91-104. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-2-91-104

## References

1. Jin Z., Yu C., Li J., Ke Y. Configuration analysis of the ERS points in large-volume metrology system. *Sensors*. 2015. V. 15, Iss. 9. P. 24397-24408. DOI: 10.3390/s150924397
2. Wang H., Shao Z., Fan Z., Han Z. Configuration optimization of laser tracker stations for position measurement in error identification of heavy-duty machine tools. *Measurement Science and Technology*. 2019. V. 30, Iss. 4. DOI: 10.1088/1361-6501/ab048b
3. Muelaner J.E., Wang Z., Keogh P.S., Brownell J., Fisher D. Uncertainty of measurement for large product verification: evaluation of large aero gas turbine engine datums. *Measurement Science and Technology*. 2016. V. 27, Iss. 11. DOI: 10.1088/0957-0233/27/11/115003
4. Takatsuji T., Goto M., Kirita A., Kurosawa T., Tanimura Y. The relationship between the measurement error and the arrangement of laser trackers in laser trilateration. *Measurement Science and Technology*. 2000. V. 11, Iss. 5. P. 477-483. DOI: 10.1088/0957-0233/11/5/305
5. Zhang D., Roltand S., Maropoulos P. Modelling and optimization of novel laser multilateration schemes for high-precision applications. *Measurement Science and Technology*. 2005. V. 16, Iss. 12. P. 2541-2547. DOI: 10.1088/0957-0233/16/12/020
6. Gai Y., Zhang J., Guo J., Shi X., Wu D., Chen K. Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly. *Measurement*. 2020. V. 165. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108144
7. Aguado S., Santolaria J., David Samper D., Aguilar J.J. Forecasting method in multilateration accuracy based on laser tracker measurement. *Measurement Science and Technology*. 2017. V. 28, Iss. 2. DOI: 10.1088/1361-6501/aa5073
8. Muralikrishnan B., Phillips S., Sawyer D. Laser trackers for large scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering*. 2016. V. 44. P. 13-28. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.12.001
9. Serdakov L.E. *Razrabotka metodiki geodezicheskogo obespecheniya dlya montazha tekhnologicheskogo oborudovaniya istochnikov sinkhrotronnogo izlucheniya. Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a procedure of geodetic support for mounting the process

equipment of synchrotron emission sources. Thesis for a Candidate Degree in Engineering]. Novosibirsk, 2020. 117 p.

10. JCGM 100: 2008. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM, 2008. 120 p.

11. Zhu X., Zheng L., Tang X. Configuration optimization of laser tracker stations for large-scale components in non-uniform temperature field using Monte-Carlo method. *Procedia CHIRP*. 2016. V. 56. P. 261-266. DOI: 10.1016/j.procir.2016.10.078

12. Aguado S., Santolaria J., Samper D., Aguilar J.J. Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification. *Precision Engineering*. 2013. V. 37, Iss. 4. P. 929-943. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.03.006

13. *Lazernye trekery API Radian* [Laser Trackers API Radian]. Available at: [https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2021/10/radian\\_web-postranichno-10\\_08\\_20.pdf](https://nevatec.ru/wp-content/uploads/2021/10/radian_web-postranichno-10_08_20.pdf)

14. GOST R 8.736-2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple Direct measurements. Methods of measurement results processing. Main positions. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 20 p. (In Russ.)