

## ПРИМЕНЕНИЕ КООРДИНАТОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СОЗДАНИИ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Лобачев Денис Иванович (dilobachev@vniief.ru), Деркач Ирина Николаевна,  
Чернов Илья Евгеньевич, Енцов Руслан Сергеевич, Воронина Наталья Валентиновна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе изложены основные принципы работы лазерного трекера. Описана возможность применения координатоопределяющей технологии при создании мощной лазерной установки.

**Ключевые слова:** координатоопределяющая технология, лазерный трекер, опорная геодезическая сеть.

## APPLICATION OF A COORDINATES DEFINING TECHNOLOGY IN DEVELOPING A LASER INSTALLATION OF NEW GENERATION

*Lobachev Denis Ivanovich (dilobachev@vniief.ru), Derkach Irina Nikolaevna,  
Chernov Ilya Evgenievich, Entsov Ruslan Sergeyeovich, Voronina Natalya Valentinovna*

FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov Nizhny Novgorod region

The paper sets forth main principles of operation of a laser tracker. A possibility of application of a coordinates defining technology in developing a high-power laser installation is described.

**Key words:** coordinates defining technology, laser tracker, a basic geodetic network.

### Введение

В настоящее время в ИЛФИ ведется работа по созданию новой лазерной установки мегаджоульного уровня энергии. На этой установке предполагается провести эксперименты по сжатию термоядерной мишени вблизи порога ее зажигания, т. е. достичь энергии выхода термоядерной реакции синтеза на уровне энергии, вложенной в лазерный импульс. Масштабы установки достигают сотен метров, рис. 1. Предполагается использование большого количества крупногабаритных конструкций и оптики, при этом почти каждый элемент должен быть смонтирован в проектное положение с точностью достигающей нескольких долей миллиметра.

Классический метод настройки многокомпонентных оптических систем состоит в применении излучения настроечного лазера или визирной трубы [1]. Реализация метода предполагает последовательную установку линз на оптическую ось, заданную уз-

ким пучком, проходящим через заранее установленные репера или диафрагмы. Использование данного метода для установки, в состав которой входит 192 независимых лазерных канала, плотно упакованных в модули, практически не реализуемо. Кроме того, замена одной из линз в процессе эксплуатации приведет к необходимости демонтажа и последующей юстировки участка оптического тракта.



Рис. 1. Лазерный зал установки

В мировой практике монтажа крупногабаритных многопроходных лазерных установок применяется геодезический метод монтажа и монтажной юстировки [2]. Метод заключается в независимом позиционировании ключевых оптических и оптико-механических компонентов установки в проектные положения во внешней системе координат. Такие технологии монтажа и юстировки носят название координатоопределяющей [3].

Наиболее подходящим для выполнения данных работ геодезическим устройством является лазерный трекер. Принцип работы лазерного трекера – это измерение 2 углов и расстояния до точки. На исследуемой поверхности объекта определяют пространственные координаты характерных точек, и с использованием специального программного обеспечения вычисляются необходимые параметры и характеристики объекта, чтобы смонтировать его в проектное положение. Монтаж конструктивных единиц установки проводится таким образом, чтобы установить элемент с указанным допуском в проектные координаты [4].

Установка состоит из 24 модулей, каждый из которых включает в себя крупногабаритные системы, имеющие характерные точки, положение которых задано в каталоге проектных координат.

Целью данной работы является создание опорной геодезической сети установки с необходимой и достаточной плотностью пунктов для обеспечения геодезического сопровождения монтажа элементов модуля силового усилителя (МСУ) и разработка методики монтажной юстировки оптической схемы мощной лазерной установки.

### Принятая система координат установки

При установке корпуса камеры взаимодействия на опору система координат задается следующим образом:

- начало системы координат расположено в наилучшей, по методу наименьших квадратов, точке скрещивания осей патрубков Ø1450 мм корпуса камеры взаимодействия;
- ось Z вертикальна;
- ось X направлена в сторону центра фланца патрубка 800/3 (диаметр в мм/№) – от многоцелевого исследовательского комплекса (МИК);
- ось Y дополняет систему до правой и направлена в сторону второго лазерного зала.

Все измерения следует привязывать к расчетной системе координат установки (РСКУ) по стабильным пунктам опорной геодезической сети, расположенным на опоре камеры взаимодействия и стенах камерного зала на первом ярусе (пункты на строительной отметке  $0 \pm 2$  м). Расположение составных частей модуля и ориентация системы координат модуля показана на рис. 2.

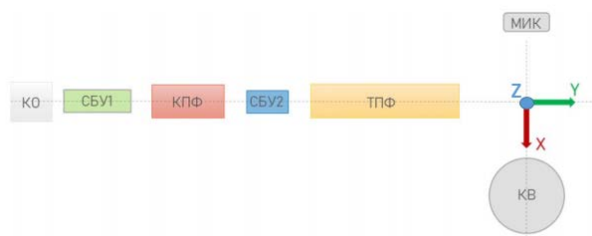


Рис. 2. Схематичное изображение модуля и РСКУ

### Основные принципы работы лазерного трекера

Принцип работы лазерного трекера – это измерение 2 углов (азимута и угла-места) и расстояния до точки. Лазерный трекер содержит 2 абсолютных энкодера для измерения углов. Измерения расстояния происходит с помощью интерферометра, либо дальнометра. Трекер может собирать данные с высокой скоростью и способен обеспечить высокую точность определения местоположения точки в пространстве на расстоянии нескольких метров.

Для выполнения работ по геодезическому сопровождению монтажа и созданию опорной геодезической сети установки (ОГСУ) использовался лазерный трекер.

AbsoluteTracker – универсальная мобильная лазерная измерительная система, рис. 3. Обеспечивает выполнение высокоточных измерений на отражатели и определение пространственного положения наблюдаемых точек с предельной погрешностью  $\pm 0,015$  мм + 0,006 мм/метр, максимальная дистанция работы (радиус) на отражатель составляет до 80 м.



Рис. 3. Трекер на штативе

Трекер был дополнен портативным беспроводным устройством для фиксации скрытых от наблюдения трекером точек, рис. 4. Наблюдение трекером ведется на группу отражателей на корпусе специализированного устройства, и полученные значения координат используются для определения в режиме реального времени положения наконечника устройства, контактирующего с измеряемым объектом.



Рис. 4. Устройство для съемки скрытых точек

В случае применения специализированного устройства суммарная погрешность определения трекером координат цели составляет  $\pm 0,05 \text{ мм} + 0,006 \text{ мм/метр}$ , максимальная дистанция работы (радиус) составляет до 25 метров.

Высокоточные отражатели предназначены для достижения максимальной (паспортной) точности при измерении точки. Высокоточный отражатель – это полый стальной шарик с установленной внутри него трипльпризмой, рис. 5. Центрирование вершины призмы с центром шарика выполнено изготовителем с допуском  $\pm 0,006 \text{ мм}$ , отклонение формы шарика от сферы – не более  $\pm 0,0015 \text{ мм}$ .



Рис. 5. Высокоточный отражатель 1,5''

В процессе геодезического сопровождения монтажной юстировки трекером важным параметром является стабильность. Для определения этого параметра необходимо, после установки прибора в рабочее положение, периодически проводить съемку одного и того пункта опорной геодезической сети или любого другого хорошо закрепленного пункта. Желательно, чтобы измеряемый пункт располагался примерно на таком же расстоянии, как и для проведения измерений. Критерием хорошей стабильности является условие не превышение величины  $\pm 0,05 \text{ мм}$  для измеренного расстояния между начальным измерением и прочими.

Перед выполнением измерений необходимо провести полевые проверки трекера. Проверки нужно выполнять в стабильных условиях: в помещении без сквозняков и техногенных воздействий на основание – вибраций, ударных работ и др. Перед проведением проверок надо выдержать прибор включенным на рабочем штативе не менее 2 часов.

### Установка прибора на станции

Для выполнения измерений лазерный трекер устанавливается на штатив, как показано на рис. 6, консольный или магнитный инструментальный столик, обеспечивающие стабильность прибора на весь период наблюдений с выбранной точки стояния.



Рис. 6. Трекеры в лазерном зале установки

Перед проведением высокоточных измерений лазерную систему трекера необходимо прогреть – включить за 30–40 минут до начала работы.

Перед началом работы штатив прибора следует выдержать на месте проведения измерений – для принятия температуры окружающей среды. Время такой выдержки пропорционально разности температур хранения и рабочей температуры штатива – 2 минуты на каждый градус разности температур.

На каждой новой станции рекомендуется выдерживать штатив в течение 10–15 минут. Если произошла резкая смена температуры – 30–40 минут.

Так как подливка пола и эпоксидное покрытие в лазерных залах выполнены с различным качеством – имеются пустоты, при установке трекера на штатив в лазерных залах следует проверять стабильность штатива при перемещении оператора в радиусе 0,5–1 м от прибора. Показания электронного уровня трекера изменяться не должны.

Ножки штатива рекомендуется дополнительно зафиксировать на полу с помощью термоклеевого пистолета.

После того, как трекер установлен, его лазерная система прогрета, штатив принял температуру окружающей среды, привести трекер в рабочее положение. Трекер необходимо горизонтировать подъемными винтами трекера. Провести инициализацию трекера и перейти к измерениям.

## Проведение геодезических измерений ОГСУ

Проведение измерений осуществляется методом свободной станции – определение положения трека в РСКУ выполняется пространственной обратной линейно-угловой засечкой, а последующее определение координат пунктов сети пространственной полярной засечкой.

При выполнении измерений визирная цель – высокоточный уголкового отражатель в сферическом корпусе  $\varnothing 1.5''$  – последовательно устанавливается на магнитный держатель отражателя каждого видимого с этой точки стояния пункта сети, рис. 7. По команде оператора лазерный трекер автоматически наводится в центр уголкового отражателя. Измеряются горизонтальное и вертикальное направления на центр отражателя, а также расстояние. По измеренным величинам вычисляются пространственные координаты центра отражателя – координаты пункта ОГСУ.

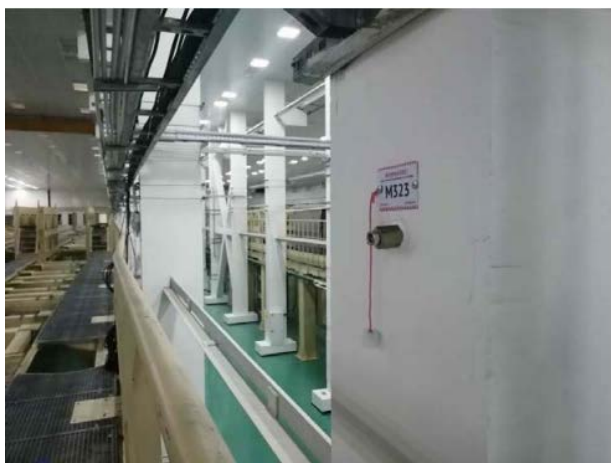


Рис. 7. Фото одного из пунктов опорной геодезической сети установки

Все измерения выполняются двумя кругами. На каждой станции определять направление вертикальной оси.

При наблюдении каждого пункта проводить внутренний контроль за величиной среднеквадратичного отклонения (СКО) каждого измерения, используя СКО-монитор. Максимально допустимое значение СКО рассчитывается в соответствии с формулой (1):

$$СКО_{\max} = 15 \text{ мкм} + 6 \text{ мкм} \times S, \quad (1)$$

где  $S$  – измеренное расстояние до пункта в метрах.

При наблюдении на станции необходимо выполнять периодический контроль за стабильностью прибора. Для этого каждые 15–20 минут выполнять повторные измерения на 2–3 пункта сети, исходных для этой станции. Стабильность оценивать по величине изменения координат этих пунктов, определенными по первоначально и повторно. Значение изменения координат (вычислять как расстояние) между первоначальным и повторным измерением не должно превышать величины, рассчитываемой по форму-

ле (1) и умноженной на  $\sqrt{2} = 1.41$ . В противном случае выявляются и устраняются причины нестабильности положения прибора, и измерения на станции повторяются.

После того как определены координаты всех видимых с точки стояния пунктов сети, выполняется замыкание на 2–3 начальных для каждой станции пункта. Величина не замыкания должна лежать в пределах допуска, что является обязательным условием завершения работы на станции. В противном случае выявляют и устраняют причину нестабильности прибора, и измерения на станции выполняются повторно. Всего на установке смонтировано 1598 пунктов опорной геодезической сети, их расположение показано на рис. 8.

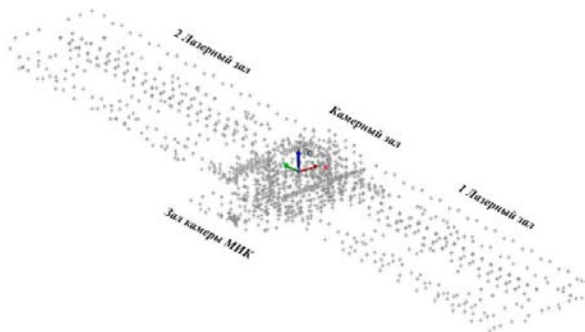


Рис. 8. Схема расположения 1598 пунктов опорной геодезической сети установки

После завершения работы на станции прибор и основание переносятся на новую точку стояния. При перемещении прибора на новую станцию его оставляют включенным. В случае если прибор был выключен, необходимо провести повторный прогрев лазерной системы.

## Геодезическое сопровождение монтажа МСУ № 12 и камеры МИК

Задача монтажа МСУ № 12 заключалась в выставлении в проектные координаты оптических элементов, блоков диафрагм и конструктивных элементов модуля (светопроводов, вакуумных кессонов и т. д.). Все координаты задавались в соответствии с технической документацией. Работы выполнялись согласно инструкциям по монтажу.

В результате работ в проектные координаты были смонтированы следующие оптические и конструктивные элементы установки:

- вакуумные кессоны;
- центральные башни пространственных фильтров;
- блоки системы транспортировки;
- узлы диафрагм;
- оптические элементы узла ввода излучения;
- оптические элементы реверсера;
- линзы пространственных фильтров;
- адаптивные зеркала.

В ходе работ было выявлено большое количество проблем, препятствующих монтажу в проектное положение, что в ряде случаев не позволило установить оптические элементы установки в пределах допуска, заданного конструкторской документацией. Максимальное превышение ошибки над допуском составило 3мм в линейной мере и  $1^\circ$  – в угловой. Однако реализованная точность монтажа элементов МСУ № 12 позволила без дополнительных действий запустить систему автоматической юстировки (САЮ), а угловой диапазон перемещений ее исполнительных зеркал и световая апертура оптических элементов обеспечили трассировку юстировочного

и силового излучения без виньетирования. Штатные измерения параметров волнового фронта и расхождености лазерного излучения на выходе МСУ № 12, а также результаты работы САЮ в процессе эксплуатации позволят сделать заключение о возможности расширения допусков на установку ключевых элементов модуля. На рис. 9 представлена камера МИК.

Задача монтажа заключалась в выставлении центра камеры взаимодействия в проектное положение, а также в сведении к минимуму расстояния от осей раструбов до центра камеры взаимодействия. Результаты монтажа камеры МИК приведены в таблице.

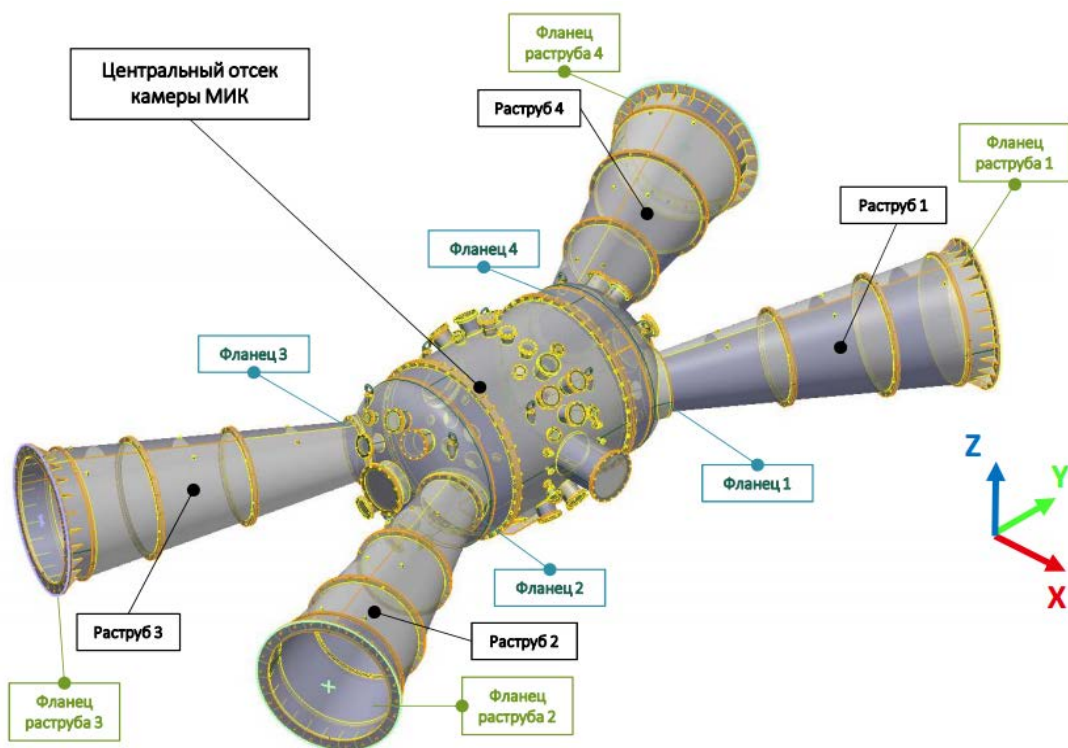


Рис. 9. Изображение камеры МИК

#### Результаты монтажа камеры МИК

Имя точки	Фактическое положение, (мм)			Проектное положение, (мм)			Отклонение фактического положения от проектного, (мм)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Центр камеры МИК	-33000.50	-1.66	-9975.88	-33000.00	0.00	-9975.00	-0.50	-1.66	-0.88
Точка скрещивания осей раструбов	-32999.77	-2.35	-9976.46	-33000.00	0.00	-9975.00	0.23	-2.35	-1.46
Отклонение Точки скрещивания осей раструбов от Центра камеры МИК							0.73	-0.69	-0.57

## Заключение

Результатом выполненных работ является опорная геодезическая сеть, содержащая более 1500 пунктов. Выпущен каталог пунктов ОГСУ с указанием физического местоположения каждого пункта. В процессе монтажа и опытной эксплуатации модуля силового усилителя была экспериментально подтверждена возможность использования мобильной координатоопределяющей технологии для точной юстировки составных частей многопроходной лазерной системы.

В конечном итоге разработана методика монтажной юстировки оптической схемы мощной лазерной установки. В процессе монтажа и опытной эксплуатации МСУ № 12 была экспериментально подтверждена возможность использования координатоопределяющей технологии для точной юстировки многопроходной лазерной системы мощной лазерной установки.

Координатоопределяющая технология и созданная на ее основе методика являются универсальными и могут применяться для решения широкого класса

задач точного позиционирования, контроля геометрических параметров и положения различных объектов.

## Список литературы

1. Кириловский В. К., Зацепин М. Е. Методы исследования и контроля качества оптических систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2013.
2. Burkhardt S. C., Bliss E., Di Nicola P., Kalantar D., Lowe-Webb R., McCarville T., Nelson D., Salmon T., Schindler T., Villanueva J., and Wilhelmsen K. National Ignition Facility system alignment // APPLIED OPTICS. 2011 Vol. 50. N 8. P. 1136–1157.
3. Куприянов А. О., Корчагин А. С., Морозов Д. А. Специальные методы прикладной геодезии. М.: МИИГАиК, 2017.
4. Гришанов В. Н., Ойнонен А. А. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники. Самара: СГАУ им. С. П. Королева, 2012.