

В. С. Крапивин¹, А. В. Полянский¹, Л. Е. Сердаков¹✉

Монтаж и установка в проектное положение элементов бустерного синхротрона «СКИФ»

¹Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: LeoSerd@yandex.ru

Аннотация. В статье описывается геодезическое сопровождение этапа монтажа оптической структуры в тоннеле Бустерного синхротрона Сибирского Кольцевого Источника Фотонов (СКИФ). Приведены основные допуски на установку в проектное положение элементов ускорителя. Перед началом монтажа оборудования в тоннеле Бустера была создана геодезическая сеть, закрепленная специальными знаками для установки сферического отражателя лазерного трекера. Элементы структуры предварительно были установлены на специальные модули – гирдеры и затем перевезены на площадку ЦКП СКИФ. Перед началом монтажа была проведена разметка мест креплений опор гирдеров. Монтаж в тоннеле происходил в два этапа – предварительная и финальная установка в проектное положение. Представлены основные результаты установки в проектное положение, даны рекомендации при проведении подобных высокоточных геодезических работ при контроле монтажа технологического оборудования.

Ключевые слова: Ускорители частиц, высокоточные геодезические работы, лазерный трекер

V. S. Krapivin¹, A. V. Polyanskiy¹, L. E. Serdakov¹✉

Assembly and alignment of the SKIF booster synchrotron

¹Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences
(BINP SB RAS), Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: LeoSerd@yandex.ru

Abstract. The article describes the geodetic support of the stage of installation of the optical structure in the tunnel of the Booster synchrotron of the Siberian Ring Photon Source (SKIF). The main tolerances for installation in the design position of the accelerator elements are given. Before the installation of the equipment in the Booster tunnel, a geodetic network was created, fixed with special signs for the installation of a spherical reflector of the laser tracker. The elements of the structure were preliminarily installed on special modules - girders and then transported to the site of the SKIF. Before the installation, the mounting locations of the girder supports were marked. Installation in the tunnel took place in two stages - preliminary and final installation in the design position. The main results of the installation in the design position are presented; recommendations are given for conducting such high-precision geodetic works when monitoring the installation of process equipment.

Keywords: Particle accelerators, high-precision geodetic works, laser tracker

Введение

В настоящее время идет активная фаза сборочных работ ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ». Инжекционный комплекс, включающий в себя линейный ускоритель, транспортный канал ЛИНАК-Бустер и Бустерный синхротрон

(Бустер), были собраны в период с лета 2024 по весну 2025 года. На данный момент времени в инжекционном комплексе идут работы с пучком электронов.

Назначение Бустерного синхротрона – ускорение электронных пучков с 200 МэВ до 3 ГэВ и последующий их перепуск в транспортный канал Бустер-Накопитель. Периметр установки 158,7 м [1]. Бустер представляет собой 4 радиусных участка – арки и 4 прямолинейных промежутка – впуск, выпуск, участки диагностики и ВЧ (рис.1).

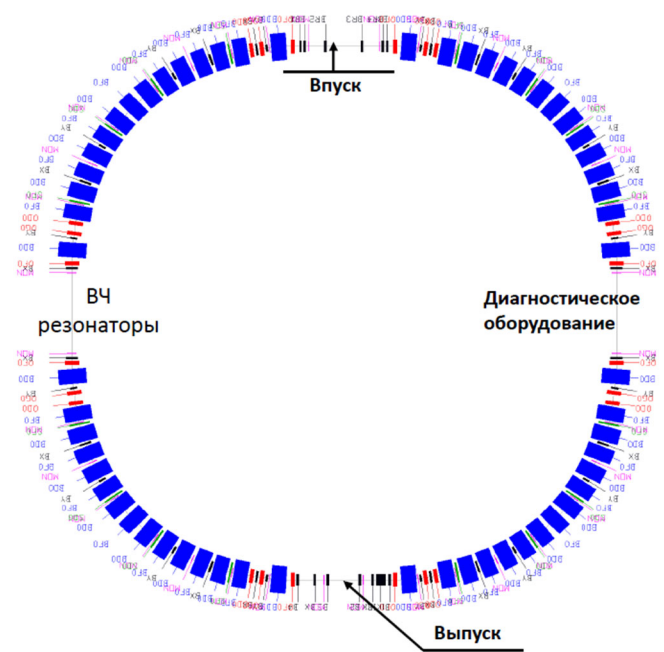


Рис. 1. Схематическая структура Бустерного синхротрона СКИФ

Значения допусков на установку элементов структуры в проектное положение получены на основании численного моделирования движения частиц. Допуски приведены в таблице 1.

Таблица 1

Допуски на установку в проектное положение элементов структуры Бустера

Контролируемое направление оси пучка	Допуск
$\Delta Z, \Delta R(Y)$	0,15 мм
ΔS	0,5 мм
$dZ, dR(dY)$	0,1 мрад

Для современных ускорительных комплексов ключевым моментом, определяющим прохождение пучка частиц по замкнутой орбите, является взаимная юстировка соседних магнитов, а не установка их строго в соответствии с проектом. Корректируется положение только тех элементов, отклонение которых от сглаживающей кривой выходит за рамки допусков на точность взаимной установки [2].

Согласование системы координат, используемой для расчётов и проектирования ускорительного комплекса, с прямоугольной системой координат, используемой при геодезическом контроле установки в проектное положение элементов структуры, показано на рис. 2.

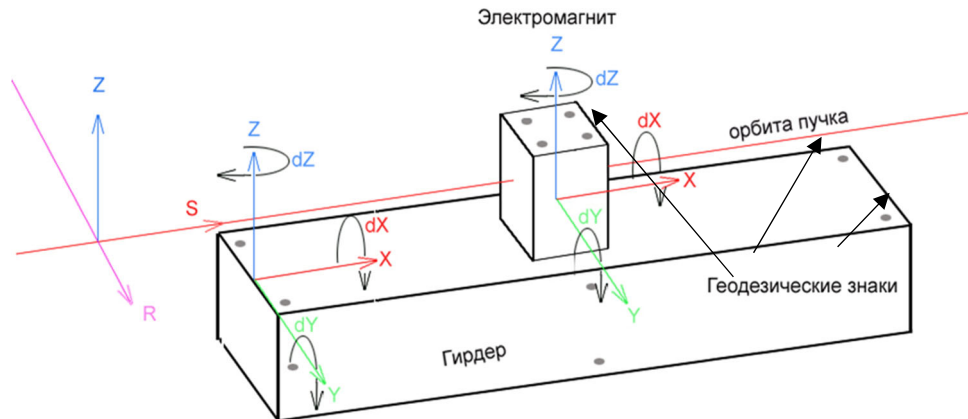


Рис. 2. Система координат Бустера и прямоугольная система координат элементов структуры

Методы и материалы

Основным прибором для контроля позиционирования элементов структуры Бустера, а также при проведении измерений положения геодезических знаков опорной сети, является лазерный трекер.

Ось, определяющаяся на этапе магнитных измерений для каждого электромагнита, фиксируется знаками под сферический отражатель трекера. Геодезические знаки элемента представляют собой отверстия для установки оснастки под отражатель, просверленные в теле электромагнита.

Всего в оптической структуре Бустерного синхротрона порядка 110 электромагнитов. Для удобства монтажа и увеличения скорости сборки на ускорительных комплексах используется модульный принцип. Модули, на которых установлены электромагниты, вакуумные камеры и вспомогательное оборудование называются гирдерами. В случае Бустерного синхротрона СКИФ используется 41 гирдер в арках и около 10 гирдеров и специальных подставок в прямолинейных промежутках. Внешний вид гирдерной сборки Бустерного синхротрона, представлен на рис. 3.

Сборка электромагнитов и остального оборудования на гирдерах производилась на территории ИЯФ СО РАН в период 2022-2023 годов. Среднеквадратическая погрешность положения элементов от проектного значения на гирдере составила 0,085 мм для поперечных направлений движения пучка.

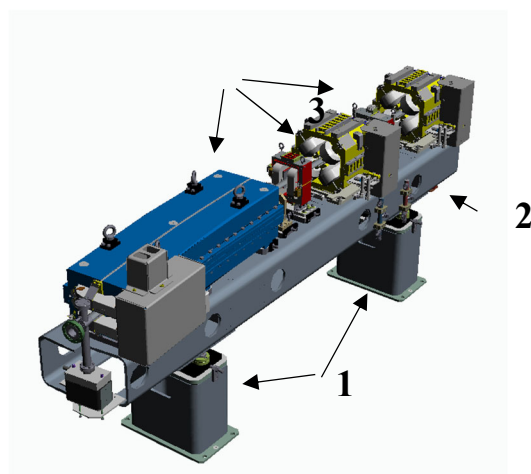


Рис. 3. Гирдерная сборка Бустерного Синхротрона СКИФ: 1 – опорные тумбы; 2 – несущая конструкция; 3 – элементы структуры ускорителя (дипольный электромагнит, корректоры, квадруполь)

Для ориентирования проектных координат в здании инъекционного комплекса, а также проведения монтажа и мониторинга положения научного оборудования, была создана опорная геодезическая сеть. Настенный геодезический знак представляет собой специальную конструкцию для однозначной постановки 1,5" отражателя лазерного трекера с постоянным магнитом и пластину для фиксации знака на бетонной стене. Схематически конструкция представлена на рис. 4.

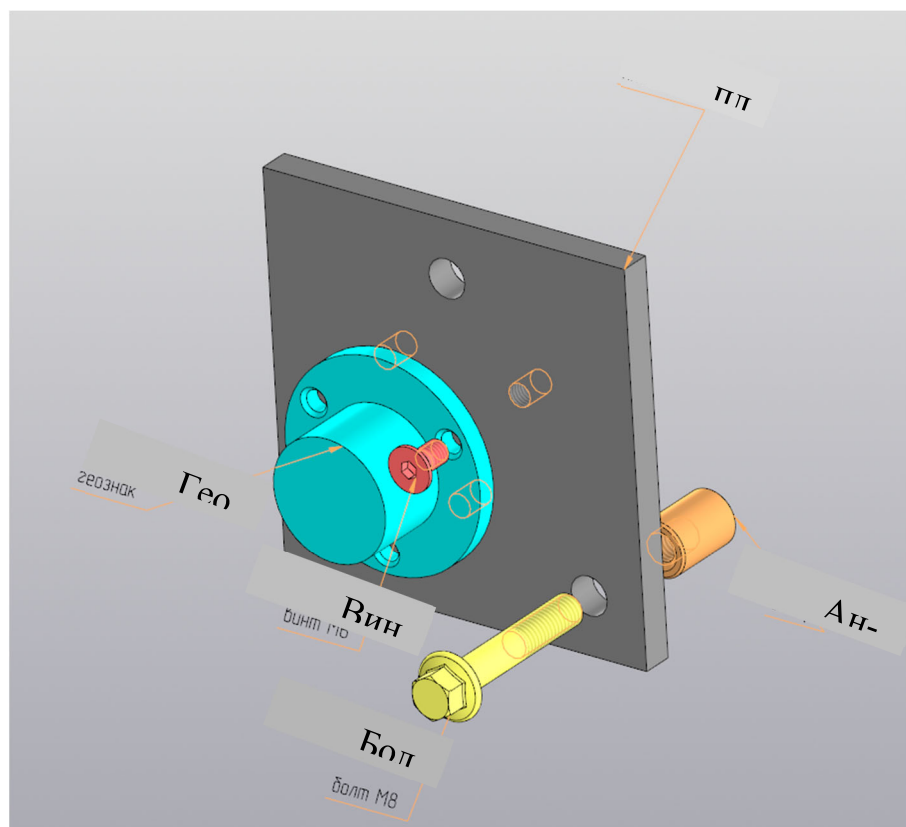


Рис. 4. Настенный геодезический знак, используемый на Бустере «СКИФ»

Всего на Бустере установлено 105 знаков на внешней и внутренних стенах тоннеля. Их расположение позволяет в любом месте установки лазерного трекера обеспечить видимость для ориентирования прибора минимум с шести знаков. Среднеквадратическая погрешность взаимного определения знаков сети в цикле измерений не превышает 0,05 мм. Периодичность измерения сети на этапе строительства ЦКП СКИФ определена 1 раз в сезон (4 раза в год) [3].

Перед началом монтажных работ, геодезическая группа ИЯФ произвела разметку под сверловку анкеров опорных тумб гирдеров и проекцию орбиты пучка на пол тоннеля. После постановки тумб они были отгоризонтированы для последующего расположения гирдерных модулей, рис. 5.



Рис. 5. Процесс установки тумб гирдерных модулей в тоннеле Бустера

Процесс предварительной установки модулей в проектное положение начинается сразу после установки тумб гирдеров. Основная задача этого этапа – стыковка вакуумных камер между гирдерами по всему периметру бустерного синхротрона.

Для исправления этого, непосредственно перед запуском ускорительного комплекса производится финальная установка в проектное положение всех элементов структуры. Этот этап является наиболее трудоемким, так как требуется обеспечить положение каждого элемента с учетом допусков. Влияние среды в помещении проведения работ при высокоточных геодезических измерениях часто является определяющим в формировании погрешностей итогового результата.

Результаты

В результате финальной юстировки гирдерных модулей в тоннеле бустера положение критически важных элементов Бустерного синхротрона определяется

в диапазоне $\pm 0,150$ мм от равновесной орбиты в поперечных направлениях (R,Z). Фрагмент графика высотных отклонений от проектного показан на рисунке 6.

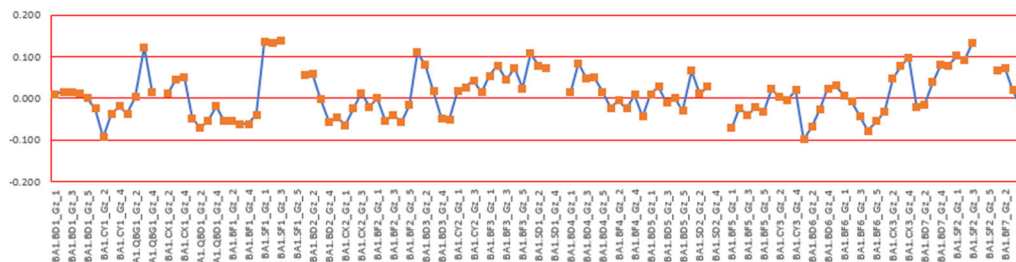


Рис. 6. Фрагмент графика отклонений фактического положения от проектного для Z направления элементов Бустера, мм

На рисунке 7 представлен график разниц от проектного положения при предварительной установке в проектное положение (синий цвет) и при финальной установке. Такая разница обусловлена тем, что в период предварительной юстировки в проектное положение, в тоннеле велись активные монтажные работы с ввозом оборудования. Это приводило к перепаду температур в 10 °С, что критически влияет на позиционирование трекера относительно опорной сети.

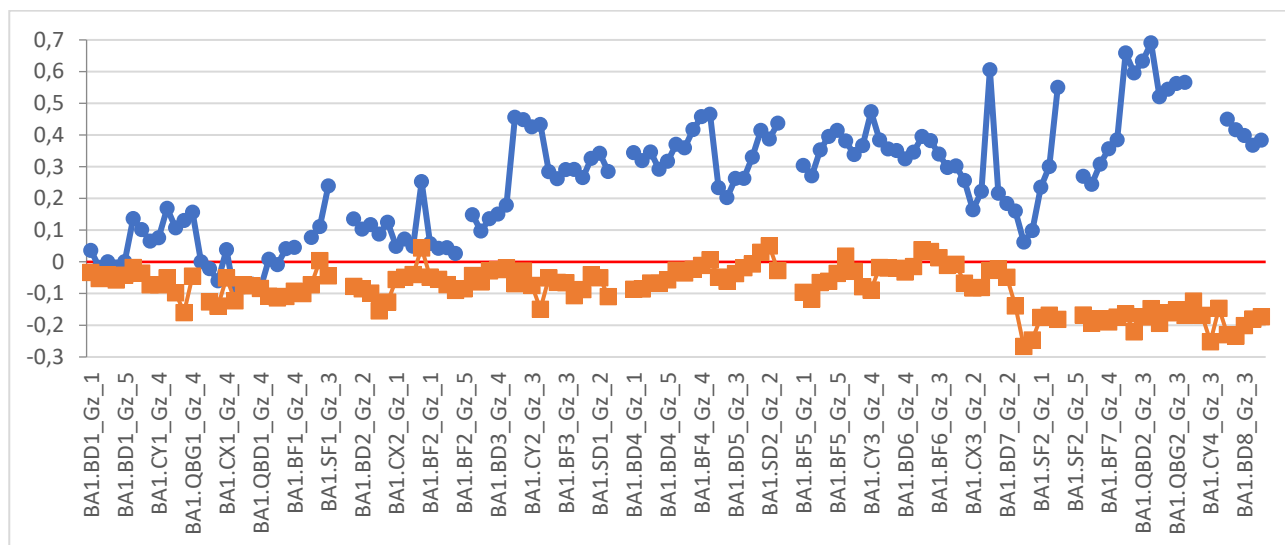


Рис. 7. Фрагмент графика отклонений фактического положения от проектного для R направления элементов Бустера при предварительной (синий цвет) и финальной (оранжевый) юстировках оборудования, мм

Обсуждение

При проведении установки в проектное положение важно помнить про влияние коллимационных ошибок на итоговый результат. Функция «Watch Windows» для контроля положения объекта в программном обеспечении Spatial Analyzer отображает текущие координаты при актуальном положении следящей головки

трекера. При смене положения головки (круг лево-круг право), результаты могут отличаться в 0,1 мм в зависимости от удаления объекта от прибора. Для однозначного определения положения объекта необходимо произвести съемку всех геодезических знаков элемента и произвести сравнение с проектными данными.

Также для повышения точности определения положения настенных геодезических знаков предлагается разработать такую схему измерений, в которой каждый знак измеряется с 4х станций трекера (четырекратное перекрытие).

Заключение

Результатами проведения геодезического контроля гирдерных модулей в туннеле Бустерного синхротрона является итоговое значение положения критически важных элементов в диапазоне $\pm 0,150$ мм от равновесной орбиты в поперечных направлениях (R,Z).

В мае 2025 в Бустерном Синхротроне был произведен пробный запуск пучка электронов, закончившийся прохождением по всему периметру установки.

Благодарности

Выражается благодарность за финансовую поддержку исследования в рамках Национального проекта «Наука и университеты» Министерству науки и высшего образования РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ». Акимов А.В., Анашин В.В., Анчуглов О.В., Арсентьева М.В., Бак П.А., Батраков А.М., Борин В.М., Буренков Д.Б., Винник Д.С., Волков В.Н., Вонда Е.С., Сердаков Л.Е. и др. // Сборник статей. В 3-х томах. Под общей редакцией К.И. Шефер, Составитель Е.Б. Левичев. Новосибирск, 2022.
2. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства, эксплуатации и мониторинга Ускорительно-накопительных комплексов / Мурзинцев П.П., Полянский А.В., Буренков Д.Б., Сердаков Л.Е. // Монография. Новосибирск, 2021.
3. Николаев, С. А. Определение периода стабилизации осадок инженерных сооружений по данным геодезических наблюдений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1978. – № 4. – С. 41–45.

© В. С. Крапивин, А. В. Полянский, Л. Е. Сердаков, 2025