

В. С. Крапивин^{1✉}, П. П. Мурзинцев², Л. Е. Сердаков¹

Геодезическое сопровождение монтажа Сибирского Кольцевого Источника Фотонов в тоннеле ускорительного комплекса

¹ Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий (СГУГиТ),
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: mr.kellivard@gmail.com

Аннотация. В статье описываются этапы монтажа с геодезическими методами контроля накопителя Сибирского Кольцевого Источника Фотонов. Приведены основные допуски на взаимное положение магнитных элементов. Для проведения монтажа и разметки в тоннеле накопителя была создана геодезическая сеть, выполнена связь с инжекционным комплексом. Перед установкой на специальные подставки – гирдеры, каждый магнит прошёл этап нахождения магнитной оси и привязки её к геознакам на теле магнита. После монтажа магнитов на гирдеры и прохождения контроля гирдеры перевозились в кольцо накопителя на специальные опоры и были соединены вакуумными камерами. Представлены основные результаты установки в проектное положение элементов на гирдеры и установка их в проектное положение в кольце накопителя СКИФ.

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

V. S. Krapivin^{1✉}, P. P. Murzintsev², L. E. Serdakov¹

Geodetic Support for the Installation of the Siberian Circular Photon Source in the Accelerator Complex Tunnel

¹ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT),
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: mr.kellivard@gmail.com

Abstract. The article describes the installation stages employing geodetic control methods for the storage ring of the Siberian Circular Photon Source. The main tolerances for the mutual positioning of the magnetic elements are presented. For the installation and alignment inside the storage ring tunnel, a geodetic network was established and linked to the injection complex. Prior to being mounted on special supports — girders — each magnet underwent a procedure to determine its magnetic axis and to reference it to geodetic marks on the magnet body. After the magnets were installed on the girders and inspected, the girders were transported to the storage ring and placed onto dedicated supports, where they were connected by vacuum chambers. The main results of positioning the elements on the girders to their design locations and installing them in their design positions within the SKIF storage ring are presented.

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

Введение

Основное предназначение накопителя СКИФ – генерация синхротронного излучения. Релятивистские электроны, полученные в инжекционном комплексе и доставленные через транспортный канал в кольцо накопителя, поворачивают в магнитном поле и, испытывая поперечное ускорение, излучают синхротронное излучение (СИ) по направлению движения. Обладая уникальными характеристиками, синхротронное излучение широко используется для исследований в самых различных областях науки и техники: биологии, химии, физике, материаловедении, катализе, геологии и т.д.

Важными характеристиками источника СИ для пользователей являются яркость и когерентность излучения. Одним из факторов, позволяющим достичь этих качеств, являются требования на взаимное положение элементов магнитной структуры. В таблице 1 приведено сравнение параметров действующих источников СИ в мире и принимаемого в эксплуатацию СКИФ.

Таблица 1 – Таблица 1, основные параметры действующих установок

	СЦСИ(В3/В4)	КИСИ	BESSY-II	Diamond	СКИФ
Е (ГэВ)	2/5.5	2.5	1.7	3	3
П (м)	74/366	121	240	561	476
ε_x (нм)	300/30	90	4	3	0.075
Год	~1970/79	~1990	1998	2007	2024
Поколение	1	2	3	3	4
Станций	19	16	46	34	>30
Страна	РФ	РФ	Ger	UK	РФ

Периметр кольца накопителя составляет 476 м с 16-ю прямолинейными промежутками длиной 6 м. Магнитная структура состоит из 16 идентичных ускоряющих секций – суперпериодов, рисунок 1.

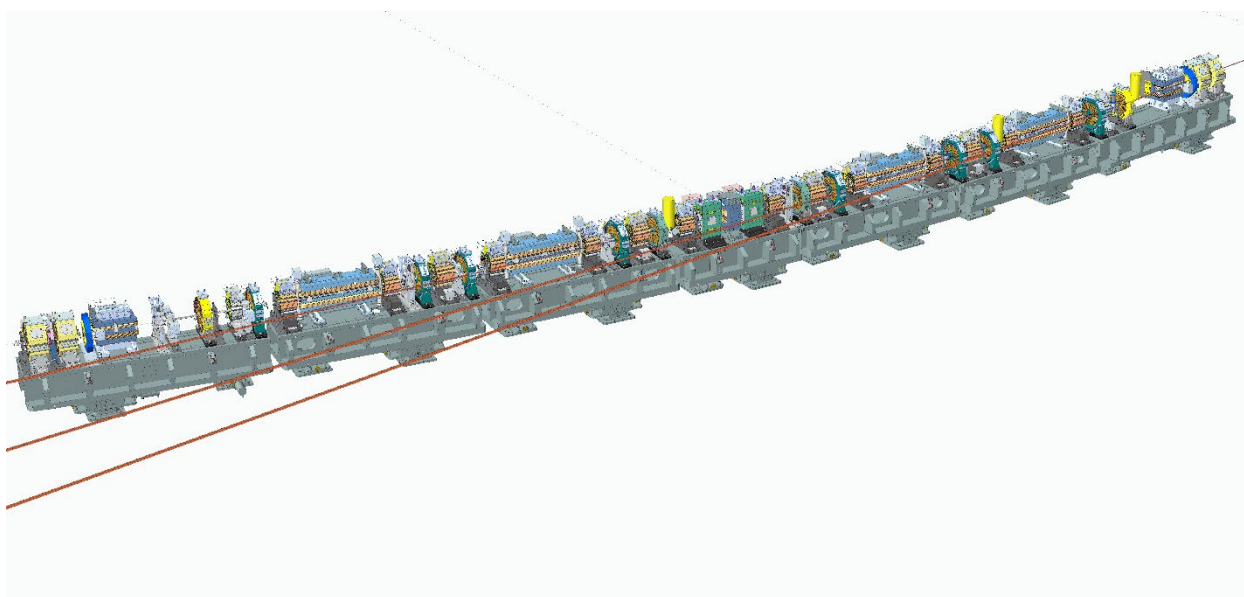


Рис. 1. Суперпериод накопителя СКИФ с выводами синхротронного излучения

В одном суперпериоде – 7 гирдеров с последовательно установленным набором электромагнитов оптической структуры ускорителя для фокусировки пучка частиц и вывода СИ, рис 2.

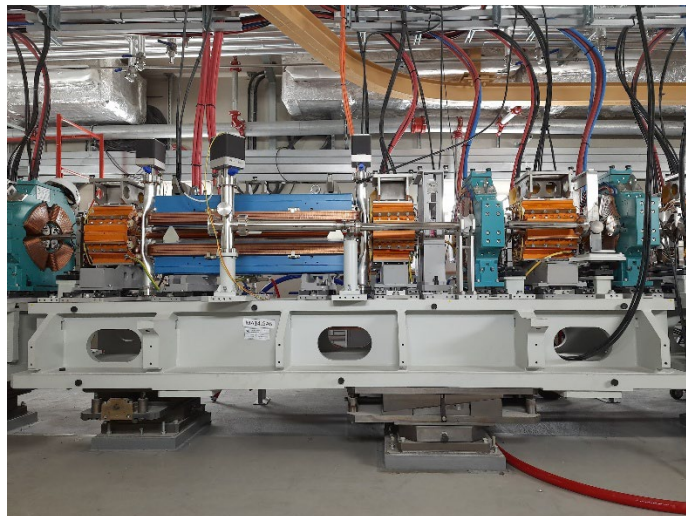


Рис. 2. Гирдер с выводом СИ

Количество элементов накопителя – 738 и количество гирдеров – 112.

Методы и материалы

Для выполнения работ использовались лазерные трекеры Leica AT403, API Radian Pro и тахеометр Leica TS 06 [1].

Каждый электромагнит проходит этап паспортизации, при котором, в числе прочего, определяется положение магнитной оси с фиксацией координат на геошпиль под сферический отражатель.

Моделирование движения частиц в накопителе СКИФ с учетом неточностей выставки, а также изучение и использование опыта современных источников СИ приводит к требованиям на точность выставки магнитных элементов СКИФ, приведенных в Таблице 2.

Таблица 2 – Требования на выставку магнитных элементов основного кольца.

	$\Delta Y, \mu\text{м}$	$\Delta Z, \mu\text{м}$	$\Delta X, \mu\text{м}$
Гирдеры	80	80	150
Элементы на гирдере	30	30	150

Значения в таблице даны в смысле среднеквадратичного отклонения от проектного положения. X – продольная координата, Y – поперечная, Z – высотная. [2]

Для выполнения условий, удовлетворяющих требованиям точности взаимного расположения элементов и сроков выполнения работ, применялся модульный принцип монтажа гирдеров, при котором электромагниты с вакуумными ка-

мерами предварительно собирались и позже перевозились в тоннель накопителя в сборе.

Сборка гирдеров происходила в отдельном здании. В помещении было организовано 4 сборочных линии по 5 гирдеров каждая, где происходил монтаж элементов на гирдеры. При установке электромагнитов использовались шаблоны для предварительной выставки, с помощью которых можно было двигать элементы в плане. Для приведения в проектное положение по высоте каждый элемент имел опоры с возможностью юстировки, рис 3.



Рис. 3. Вставка элементов с помощью шаблонов

Затем выполнялась съёмка гирдера с элементами с 4 стоянок, для проверки положения относительно проекта. [3,4]

Следом шло снятие верхней части с магнитов для установки камеры, обратная сборка с проверкой сохранения положения посредством съёмки с 4 станций. рис 4.



Рис. 4. Гирдер с установленной вакуумной камерой

Завершающим этапом шла финальная съёмка с 4 станций для получения паспорта координат гирдера, для загрузки в рабочий файл для монтажа накопителя. Повторная съёмка выполнялась для проверки однозначности сборки элементов после разборки. Результаты измерений и соответствие на точность выставки представлены в графиках 1, 2 (рис. 5).

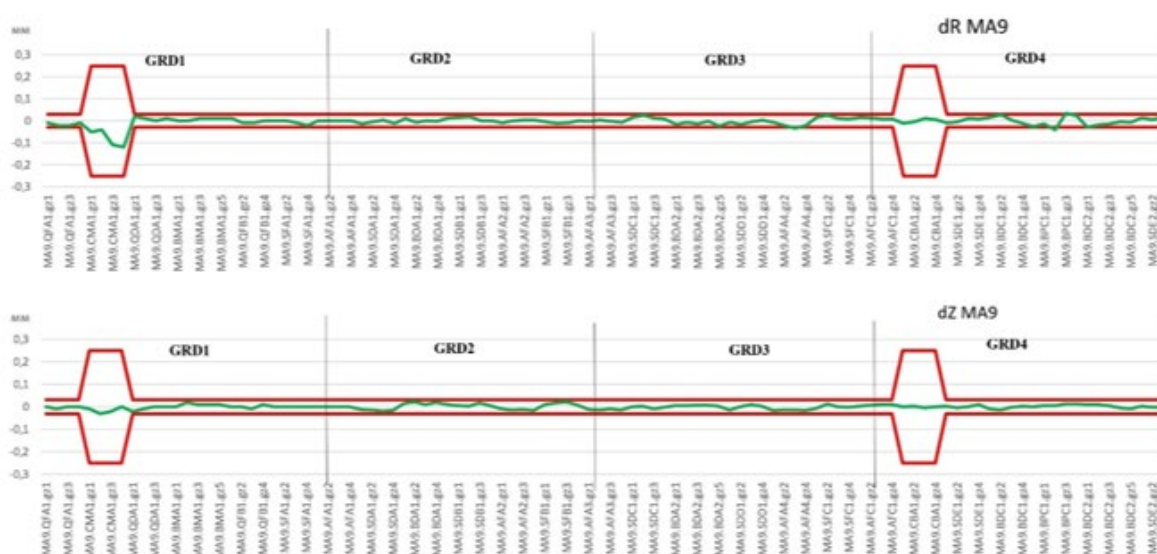


Рис. 5. Графики 1,2 результатов измерений и соответствие на точность выставки на примере первых четырёх гирдеров арки № 9

Опорная геодезическая сеть состоит из 368 знаков, расположенных на внутренней и внешних стенах тоннеля, рис 6. [5]



Рис. 6. Геознак сети с уголковым отражателем

Связь между транспортным каналом и тоннелем накопителя выполнялась через отверстие для вакуумной камеры и специальное окно, рис 7.



Рис. 7. Съёмка для связи сетей инъекционного комплекса и кольца накопителя

В условиях сжатых сроков реализации этапов проекта работы всех групп в тоннеле накопителя выполнялись параллельно. Прекращение других работ при выполнении геодезических задач было невозможно. Для объективной оценки стабильности сети, была применена схема измерения цикла, при которой обеспечивалось четырёхкратное перекрытие каждого знака, рис 8. [6]

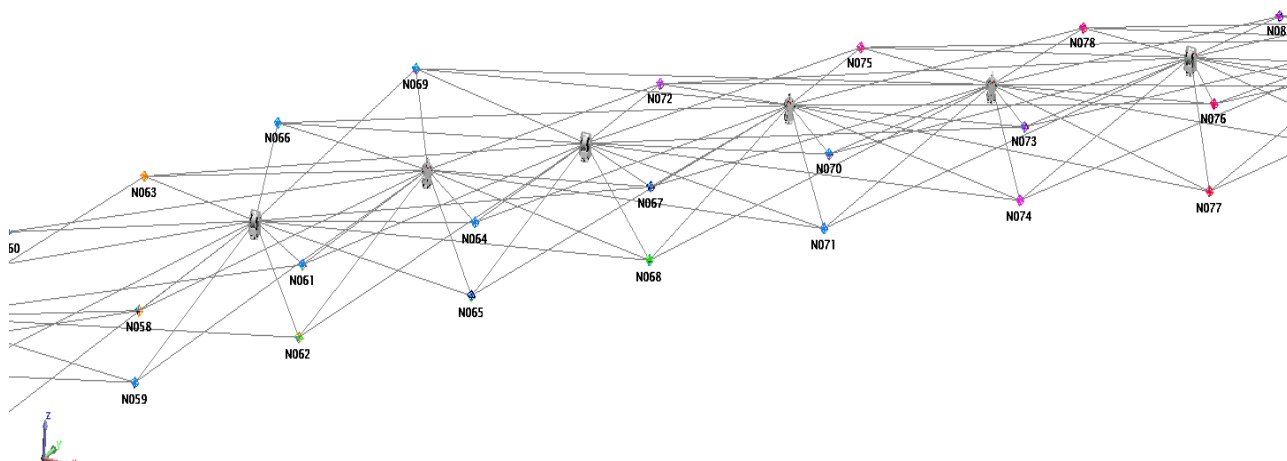


Рис. 8. Фрагмент схемы измерения сети с 4х-кратным перекрытием каждого знака

Для оценки достоверности уравнивания сети таким способом было выполнено сгущение сети в инжекторе до уличных ворот и из тоннеля накопителя в пользовательский зал до уличных ворот. В таблице 2 даны результаты засечки тахеометром на знаки у ворот инжектора и накопителя, принятые за исходные. На рис. 9 изображены места стоянки прибора (STN1, STN2), при выполнении измерений на пункты (T9, T10, D4, D5, N1, N2).

Таблица 2 – Результаты засечки тахеометром Leica TS 06 на знаки сгущенной сети

Имя пункта	X	Y	mXY	H	mH
пункты ПВО					
D4	48,4401	-21,9428		0,8662	
D5	48,3590	-21,9486		-0,2170	
N1	-26,0010	32,6190		0,9060	
N2	-26,0030	32,6000		-0,7300	
STN1	76,7162	58,2575	0,00084	3,0146	0,00123
STN2	75,2623	58,5509	0,00077	3,0064	0,00125
T9	95,6599	72,8485		3,4974	
T10	95,6616	72,8570		5,1900	

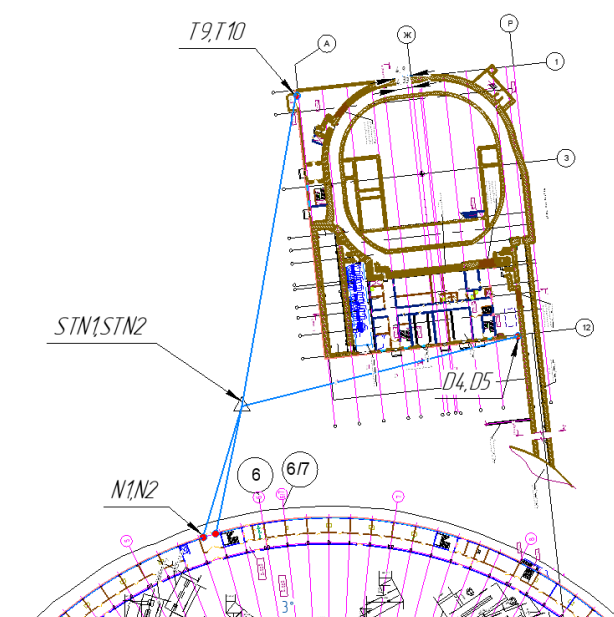


Рис. 9. Место стоянки тахеометра при выполнении съёмки (STN1, STN2)

Перед началом сборки арки в тоннеле накопителя была выполнена разметка проекции орбиты пучка на пол и расположения опор гирдеров. Следующим этапом была установка пластин под опоры гирдеров и приведение их к проектному уровню, установка опор на эти пластины и установка гирдеров на опоры. После чего был начат монтаж гирдеров и выставка их в проектное положение со стыковкой вакуумных камер, рис 10.



Рис. 10. Монтаж гирдеров с вакуумными камерами

Результаты

Монтаж гирдеров и сборка вакуумной камеры во всех арках завершена, идёт монтаж прямолинейных участков и выводов СИ. Положения гирдеров после сборки показаны в графиках 3,4 (рис. 11).



Рис. 11. Графики 3,4 положение гирдеров после сборки вакуумной камеры на примере первых 4 гирдеров 9 арки.

Можно обратить внимание на то, что положение гирдеров и отдельных элементов находится за допуском. Это связано тем, что для монтажа вакуумной камеры допуски на выставку ниже и выставка гирдеров проходила в течение 5 месяцев с последнего цикла измерения сети.

Обсуждение

Дальнейшим этапом монтажа оборудования комплекса последует работа в исследовательских площадках в пользовательском зале, для чего в нём требуется заложить опорную сеть и выполнить её связь с остальной сетью комплекса.

Заключение

После завершения сборки элементов накопителя будет выполнен очередной цикл измерений сети тоннеля накопителя и уравнивание результатов. На основании этих измерений будет выполнена финальная выставка гирдеров и отдельных элементов.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буренков Д.Б., Мурзинцев П.П., Полянский А.В., Пупков Ю.А., Сердаков Л.Е. Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 3-6.
2. Пупков Ю.А., Протопопов И.Я., Скринский А.Н. Система допусков на установку магнитов ускорителей на большие энергии // Геодезические работы при монтаже и эксплуатации технологического оборудования : материалы научн. -техн. конф. – Новосибирск, 1978. –С. 99-103.
3. Сердаков Л.Е., Буренков Д.Б., Мурзинцев П.П., Полянский А.В. О выборе местоположения станций лазерного трекера для установки технологического оборудования // Геодезия и картография. – 2019. – №11. – С. 22-25.
4. Мурзинцев П.П., Полянский А.В., Буренков Д.Б., Сердаков Л.Е. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства, эксплуатации и мониторинга ускорительно – накопительных комплексов. – Монография. Новосибирск, 2021.
5. Сердаков Л.Е., Мартин Д., Мурзинцев П.П. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения ESRF // Геодезия и картография. – 2018. – №11. – С. 2-8.
6. Медведская Т.М. Исследование точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, №2. – С. 56-65.

© В. С. Крапивин, П. П. Мурзинцев, Л. Е. Сердаков, 2026