

Научная статья

УДК 528.53 621.3038.61

DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-9-22

Геодезическое сопровождение монтажа и эксплуатации линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20

**Леонид Евгеньевич Сердаков¹, Андрей Викторович Полянский¹
Петр Алексеевич Бак¹, Елена Сергеевна Вонда¹
Владимир Сергеевич Крапивин¹, Кирилл Игоревич Живанков¹
Полина Алексеевна Полозова¹, Олег Альфредович Никитин²
Александр Рамзисович Ахметов², Илья Владимирович Пензин²**

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

² Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина
Снежинск, Россия

LeoSerd@yandex.ru
polyanski_inp@mail.ru
P.A.Bak@inp.nsk.su
E.S.Vonda@inp.nsk.su
V.S.Krapivin@inp.nsk.su
K.I.Zhivankov@inp.nsk.su
P.A.Polozova@inp.nsk.su

Аннотация

В статье приводятся методические и технологические решения геодезического сопровождения проектирования и монтажа линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20. На основании допусков позиционирования элементов ускорителя и геометрии помещений разработана схема расположения знаков опорной сети в зданиях. Исследованы результаты математического моделирования для оценки точности взаимного положения геодезических знаков и позиционирования лазерного трекера в помещении ускорителя. Для согласования строительных конструкций со структурой ускорителя была произведена съемка, результатом которой стала пространственная модель здания. Приведены решения, применявшиеся для фиксации системы координат всего ускорительного комплекса, описаны процессы определения осей элементов ускорителя и создания связанных с ними локальных систем координат, монтажа оборудования и юстировки в проектное положение. Приведены данные, отображающие динамику относительных смещений знаков опорной геодезической сети по шести циклам измерений за период 2018–2024 гг.

Ключевые слова

линейный индукционный ускоритель, опорная геодезическая сеть, лазерный трекер, геометрический контроль элементов ускорителя

Для цитирования

Сердаков Л. Е., Полянский А. В., Бак П. А., Вонда Е. С., Крапивин В. С., Живанков К. И., Полозова П. А., Никитин О. А., Ахметов А. Р., Пензин И. В. Геодезическое сопровождение монтажа и эксплуатации линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20 // Сибирский физический журнал. 2025. Т. 20, № 3. С. 9–22. DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-9-22

© Сердаков Л. Е., Полянский А. В., Бак П. А., Вонда Е. С., Крапивин В. С., Живанков К. И., Полозова П. А., Никитин О. А., Ахметов А. Р., Пензин И. В., 2025

Geodetic Support for LIA-20 Linear Induction Accelerator Assembly and Operation

Leonid E. Serdakov¹, Andrey V. Polyansky¹, Petr A. Bak¹, Elena S. Vonda¹,
Vladimir S. Krapivin¹, Kirill I. Zhivankov¹, Polina A. Polozova¹, Oleg A. Nikitin²,
Alexander R. Akhmetov², Ilya V. Penzin²

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

² Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics
Snezhinsk, Russian Federation

LeoSerd@yandex.ru
polyanski_inp@mail.ru
P.A.Bak@inp.nsk.su
E.S.Vonda@inp.nsk.su
V.S.Krapivin@inp.nsk.su
K.I.Zhivankov@inp.nsk.su
P.A.Polozova@inp.nsk.su

Abstract

The article presents methodological and technological solutions for geodetic support of the LIA-20 linear induction accelerator design and assembly. Based on the facility geometry and the accelerator elements positioning tolerances, the arrangement scheme was developed for reference geodetic network signs. To assess the accuracy of the geodetic signs mutual location and the laser tracker positioning in the accelerator hall, the results of mathematical modeling were studied. To coordinate the facility design with the structure of the accelerator, a survey was carried out, so the spatial model of the building was obtained. Here we show the procedures of elements' axes determination and corresponding local coordinate systems construction for elements of accelerator. The solutions for fixing the coordinate system of the entire accelerator complex are given. The processes of equipment installation and setting into the design position are reported. The data showing the dynamics of the reference geodetic network signs relative displacement over 6 measurement cycles (2018 - 2024 period) are presented.

Keywords

linear induction accelerator, reference geodetic network, laser tracker, accelerator elements geometric measurements

For citation

Serdakov L. E., Polyansky A. V., Bak P. A., Vonda E. S., Krapivin V. S., Zhivankov K. I., Polozova P. A., Nikitin O. A., Akhmetov A. R., Penzin I. V. Geodetic support for LIA-20 linear induction accelerator assembly and operation. *Siberian Journal of Physics*, 2025, vol. 20, no. 3, p. 9–22. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2025-20-3-9-22

Введение

Технически сложные в реализации инженерные объекты, к которым относятся ускорители частиц, требуют детальной проработки всех этапов монтажа на стадии проектирования. Важной их частью является обеспечение контроля геометрических параметров элементов и ускорительного комплекса в целом на основании методических рекомендаций прикладной геодезии. В мировой практике имеется множество примеров успешного ввода в эксплуатацию подобных объектов, в том числе и на территории СССР. Однако публикации о реализации подобных проектов с использованием современных методов измерений и технологических решений для сборки уникального оборудования малочисленны. В данной статье изложены решения и подходы к задаче высокоточного монтажа линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20 на территории ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ», город Снежинск.

Технические требования на выставку оборудования

Необходимым условием для достижения расчетных параметров пучков заряженных частиц является соблюдение требований к точности установки элементов структуры ускорителя

в проектное положение и поддержание их в таком состоянии весь эксплуатационный период. Для выбора стратегии геодезического сопровождения высокоточного монтажа и эксплуатации инженерного объекта необходимо располагать требованиями для каждого типа технологического оборудования. Такими требованиями для ускорителя ЛИУ-20 являются допуски на позиционирование основных элементов структуры, приведенные в табл. 1, где X – продольная, а Y , Z – поперечные координаты относительно орбиты пучка, α , β – углы вращения вокруг осей Y , Z .

Таблица 1

Допуски на позиционирование основных элементов ЛИУ-20

Table 1

Tolerances for the LIA-20 accelerator elements positioning

Название элемента	X , мм	Y , мм	Z , мм	Углы α , β , mrad
Соленоид	0,5	0,1	0,1	1
Квадруполь				
Диполь				
Септум-магнит				
Блок системы регистрации (детектор)	–	0,25	0,25	–

Предполагая ошибки установки случайными и некоррелированными, допуски задаются в виде среднеквадратических отклонений магнитных либо механических осей элементов от их расчетного пространственного положения. Каждый элемент имеет свои конструктивные особенности, и при монтаже необходимо руководствоваться паспортом изделия, в котором содержатся данные взаимной привязки геодезических (реперных) знаков и оси магнитного элемента.

Для оценки точности определения координат знаков опорной геодезической сети была разработана упрощенная схема измерений с последующим математическим моделированием на основании общих габаритов помещений, в которых выполняется монтаж оборудования. Основным средством измерений, позволяющим удовлетворить требованиям, представленным в табл. 1, является мобильный координатно-измерительный прибор – лазерный трекер. В программном обеспечении управления и обработки данных лазерным трекером Spatial Analyzer имеется модуль математического моделирования и обработки измерений с возможностью внесения случайной ошибки пропорционально расстоянию от трека до геодезического знака сети [1]. Предварительный расчет точности выполняется на основе априорно заданных геометрических связей, паспортной точности применяемого прибора, выбранных режимов измерений.

Этап проектирования

Ускоритель ЛИУ-20 используется в качестве источника тормозного излучения в гамма-диапазоне для многоракурсной рентгенографии быстротекущих процессов. Оборудование ускорителя располагается в двух помещениях (рис. 1): ускорительный зал (1), в котором находится инжекторная часть и ускоряющие модули (на левой половине рис. 1), и зал разводки пучка (2), где расположены каналы транспортировки пучка с элементами магнитной оптики и мишенными узлами, охватывающими исследуемый объект (на правой половине рис. 1). Девять мишенных узлов задают возможность просвечивания объекта по девяти ракурсам (в настоящее время реализовано два из девяти ракурсов). Вывод излучения из зала разводки пучка

к объекту исследований осуществляется через имеющиеся в стенах здания отверстия – амбразуры. Аппаратура для регистрации излучения, прошедшего через исследуемый объект в заданном ракурсе, располагается в отдельном здании системы регистрации излучения (4). Блоки регистрации излучения по каждому из ракурсов располагаются за выходом амбразуры, которая соответствует этому ракурсу.

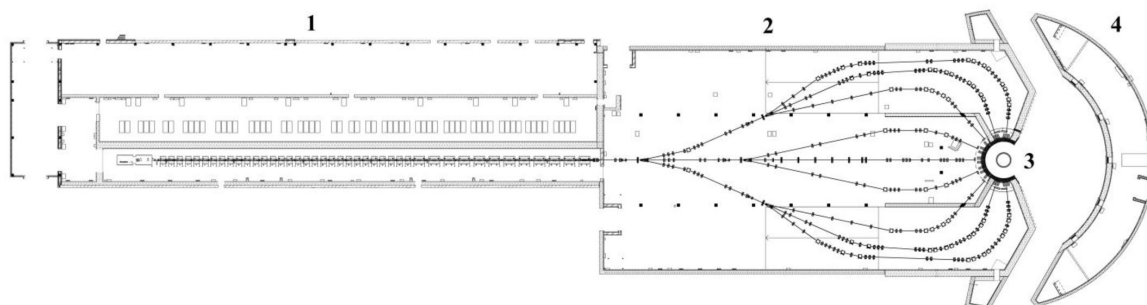


Рис. 1. Вид сверху на расположение оборудования ускорителя ЛИУ-20 внутри здания: 1 – ускорительный зал; 2 – зал разводки пучка; 3 – исследуемый объект; 4 – здание системы регистрации излучения

Fig. 1. Top view of the LIA-20 accelerator equipment arrangement inside the building: 1 – accelerator hall; 2 – beam splitting hall; 3 – studied object; 4 – radiation registration system building

Для залов были определены проектные положения геодезических знаков опорной сети в общей системе координат. Выбор расположения станций лазерного трекера основывался на проведенных ранее исследованиях [2]. Общее количество геодезических знаков сети, позволяющее обеспечить процесс измерений в любом месте ускорительного комплекса, составило 102 единицы. При моделировании измерений опорной сети определено количество станций лазерного трекера: для ускорительного зала – 6, для зала разводки пучка – 12. Общая схема измерений в графической среде Spatial Analyzer представлена на рис. 2.

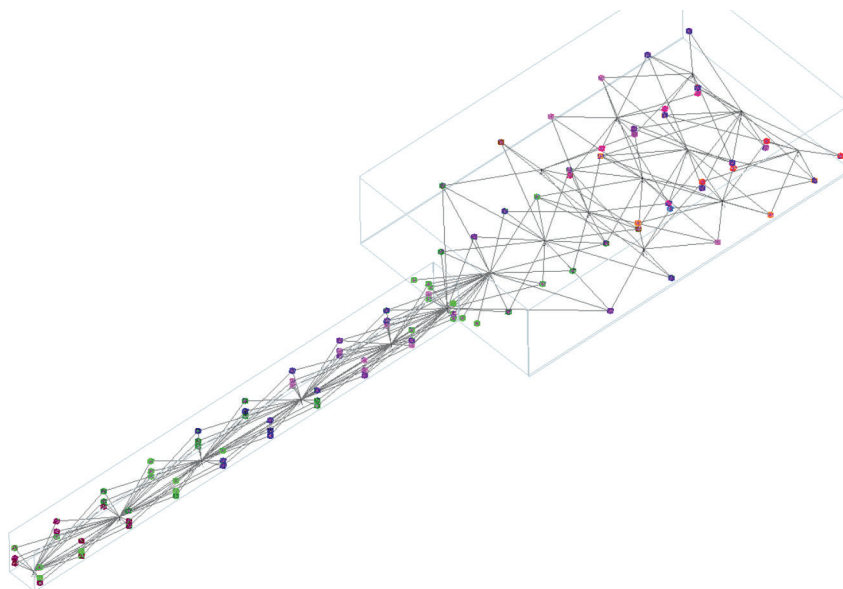


Рис. 2. Схема измерений для проведения математического моделирования

Fig. 2. Measurement scheme for mathematical modeling

Среднеквадратическая погрешность (СКП) определения взаимного пространственного положения геодезических знаков сети по результатам уравнивания составила 0,051 мм, максимальная погрешность 0,251 мм. Также проведено моделирование для оценки точности определения координат позиционирования трекера в сети в трех местах помещений (центр ускорительного зала, центр зала разводки пучка и вблизи стен зала разводки пучка) методом обратной полярной засечки относительно уравненного цикла измерений. СКП позиционирования составило соответственно 0,052 мм, 0,065 мм и 0,058 мм. Критерий оценки качества измерений в сети для использования при монтаже можно представить в виде

$$m_{\text{поз.доп.}} < \frac{D_{y,z} \sqrt{2}}{2} \text{ (мм)},$$

где $m_{\text{поз.доп.}}$ – допустимая СКП позиционирования лазерного трекера; $D_{y,z}$ – величина допуска на установку в проектное положение элементов в поперечных направлениях относительно оси.

Этап монтажа геодезической сети в помещении ЛИУ-20 и измерения первого цикла

В силу различных причин сроки сдачи строящегося сооружения часто пересекаются с началом геодезических работ по обеспечению монтажа оборудования. В этой ситуации первоначально устанавливаются геодезические знаки опорной сети с минимально необходимым их количеством, чтобы произвести первый цикл измерений и выполнить ориентировку системы координат ускорителя внутри здания. Обеспечить сохранность всех закрепленных знаков при производстве различного рода строительных работ не всегда возможно. Для увеличения плотности сети прибегают к установке временных знаков в зонах, где производство строительных работ уже закончено. Общий вид геодезического знака разработки ИЯФ СО РАН с магнитным держателем отражателя представлен на рис. 3.



Рис. 3. Геодезический знак с установленным отражателем
Fig. 3. Geodetic sign with installed reflector

Для ориентирования системы координат ускорительного комплекса внутри здания была закреплена сеть первого этапа, состоящая из 40 геодезических знаков, из них 19 в ускорит-

тельном зале, 16 в зале разводки пучка и 5 на трубах амбразур. Кроме измерений положения геодезических знаков, был проведен контроль положения 9 амбразур, отверстия между ускорительным залом и залом разводки пучка. Центр входа и выхода трубы амбразуры образуют ось. Начало системы координат формируется как центр пересечения осей девяти амбразур. Ось X направлена к инжектору ускорителя. Ось Z направлена вверх. Для определения согласованности осей амбразур и положения окон в здании системы регистрации рентгеновского излучения были произведены измерения при помощи лазерного трекера. Графическое представление этой работы представлено на рис. 4.

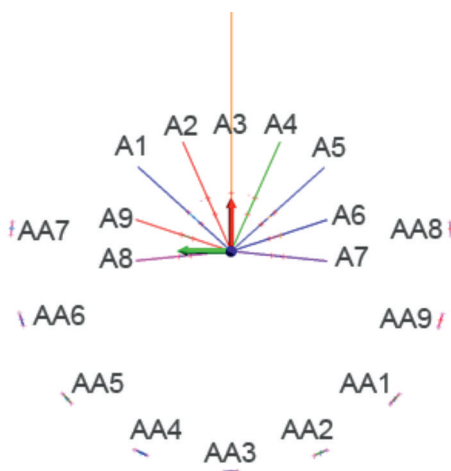
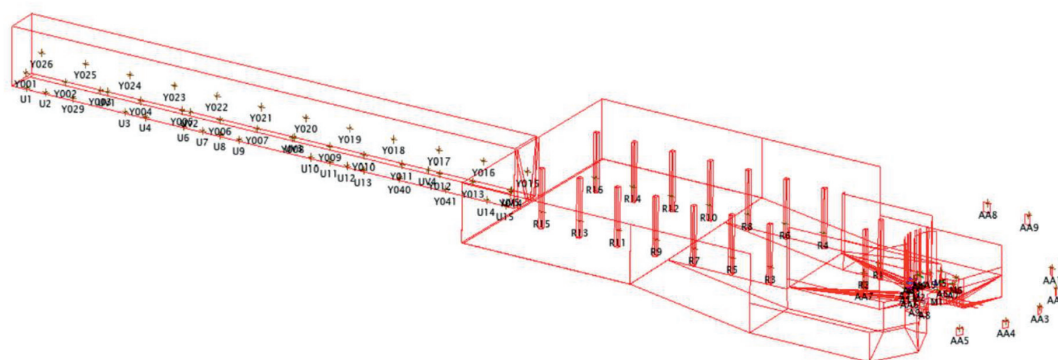


Рис. 4. Положение осей амбразур (здание ускорителя, литера А) и центров окон (здание системы регистрации, литера АА)
Fig. 4. Embrasure axes position (accelerator building, letter A) and window centers (registration system building, letter AA)

Для оценки соответствия строительных конструкций здания проектной документации и согласования со структурой ускорителя были проведены геодезические работы для создания цифровой модели помещений. Общий вид модели здания с местами установки геодезических знаков представлен на рис. 5.



Геометрический контроль сборки элементов ускорителя ЛИУ-20

Ускорительный комплекс ЛИУ-20 состоит из нескольких типов элементов: инжектор, формирующий электронный пучок; короткие (КУМ) и длинные (ДУМ) ускоряющие модули, увеличивающие энергию пучка до номинального значения; соленоидальные и квадрупольные линзы, удерживающие частицы пучка в сечении вакуумного канала; дипольные магниты, септум-магниты, кикеры, обеспечивающие отклонение пучка в поперечном направлении; мишенные узлы с конверсионными мишенями, рассеивающими электронный пучок и генерирующими тормозное излучение; а также профилометры (детекторы черенковского и переходного излучения) и датчики положения пучка, дающие информацию о распределении плотности заряда и положении пучка в поперечной плоскости.

В сферу геодезического обеспечения попадает работа по определению механической оси большинства вышеперечисленных элементов и фиксации ее положения при помощи специальных знаков для установки отражателя лазерного трекера. Процедура измерений производится непосредственно в залах размещения оборудования ускорителя перед монтажом по нескольким причинам: такие элементы, как инжектор и короткие/длинные ускоряющие модули, ввиду их большой массы и габаритов, а также невозможности перевозки их в собранном состоянии, требуют геодезической поверки по месту сборки. Остальные, менее габаритные элементы – квадрупольные линзы, дипольные магниты и пр. монтируются на вакуумную камеру, что также требует их разборки на месте установки.

Инжектор обеспечивает формирование и первоначальное ускорение электронного пучка до энергии 2 МэВ. Для формирования электронного пучка с минимальными искажениями распределения объемного заряда важно соблюдать расчетную геометрию вакуумного диода, обеспечивая параллельность и соосность катода и анода. Катод в инжекторе ЛИУ-20 имеет форму сферического сегмента, в то время как полеобразующая поверхность анода представляет собой тороид неправильного сечения [4]. Взаимное позиционирование катода и анода осуществлялось с контролем лазерным трекером в режиме сканирования. После определения оси вакуумного диода и фиксации локальной системы координат инжектора последняя привязывалась к геодезическим знакам на внешней поверхности центрального корпуса инжектора.

Кроме вакуумного диода, в электронно-оптическую систему инжектора входит секционированная ускорительная трубка, увеличивающая энергию пучка на значения до 1 МэВ, и три импульсные соленоидальные линзы, фокусирующие электронный пучок и обеспечивающие расчетные параметры его огибающей.

Моделирование электронно-оптической системы ускорителя при помощи различных программных средств показало, что конфигурация ускоряющих зазоров в ускорительных трубках практически не выдвигает требований к их положению (при соблюдении допусков, указанных в чертежах), в то время как угол поворота и смещение относительно оси ускорителя магнитных элементов ускорительного тракта весьма критично и требует обязательной геодезической выставки.

Ускорительная трубка жестко устанавливается на центральном корпусе инжектора и не допускает возможности юстировки, в то время как соленоидальные линзы, представляющие собой цилиндрический металлический внешний корпус – магнитный экран, внутри которого находится обмотка, фиксируются непосредственно на вакуумной камере с помощью диэлектрических прокладок, внутри которых имеются отжимные юстировочные винты. Каждая линза проходила паспортизацию для определения механической оси контактным сканированием отражателя лазерного трекера по внешнему корпусу (магнитопроводу). Магнитная же ось линзы, представляющая больший интерес с точки зрения выставки на ось оптической системы, трудно поддается определению из-за малой длины линзы, однако в достаточной мере совпадает с положением оси механической.

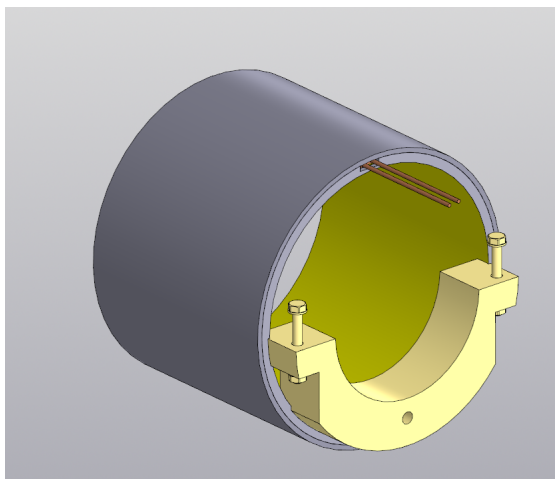


Рис. 6. Соленоидальная линза ЛИУ-20 и часть ее опоры на вакуумную камеру
Fig. 6. LIA-20 solenoidal lens and a part of its vacuum chamber support

Короткие ускоряющие модули служат для увеличения энергии сильноточного электронного пучка на ~ 340 кэВ. Они используются в начале ускорителя, где расчетная электронная оптика предполагает наличие более регулярного расположения соленоидальных линз (часть из них расположена между КУМ), чем во второй его половине, где энергия пучка выше и применяются длинные ускоряющие модули. В состав электронно-оптической системы КУМ входит ускорительная трубка, жестко закрепленная на несущем фланце, и импульсная соленоидальная линза (рис. 6), жестко закрепленная на вакуумной камере, соединенной с ускорительной трубкой. При такой компоновке требуется выполнить геометрическую привязку фактического положения механической оси соленоида к геодезическим знакам, расположенным на внешнем фланце КУМ (рис. 7). На стадии сборки всех КУМ измерялось положение механической оси соленоидальной линзы, после чего выбиралась такая локальная система координат КУМ, в которой ее ось X проходила через механическую ось линзы. Центр системы координат задавался по номинальному расстоянию от базового фланца модуля. Ось Z задавалась таким образом, чтобы значения координаты Z геодезических знаков G1 и G2 были равны.

Соленоидальные линзы, расположенные между КУМ, имеют собственные юстирующие элементы на несущих опорах и выставляются отдельно после окончания сборки вакуумной системы ускорителя.

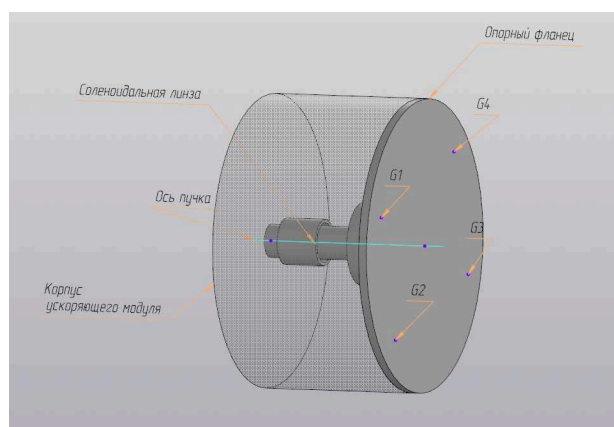


Рис. 7. Схематичное изображение КУМ
Fig. 7. Short acceleration module (SAM) scheme picture

Длинный ускоряющий модуль (ДУМ) служит для увеличения энергии пучка на ~ 680 кэВ во второй половине ускорительного зала, где расчетная оптика допускает более редкое расположение соленоидальных линз. Фактически ДУМ представляет собой два КУМ, симметрично собранных на общем центральном фланце. Очевидно, что одновременно выставить на ось две соленоидальные линзы, неподвижно закрепленные на жестко связанных между собой вакуумных камерах, невозможно, поэтому конструкция ДУМ отличается наличием юстирующих отжимных винтов на опорах линз. При сборке ДУМ обе линзы устанавливаются на ось вакуумной камеры, полученную после измерения фланцев с двух станций лазерного трекера (сторона входа и выхода пучка в модуль). Далее по результатам измерений с двух станций получают уравненные данные, которые в последующем являются паспортными для конкретного измеренного модуля. Паспортизация дипольных и квадрупольных электромагнитов подробно описана в работе [3].

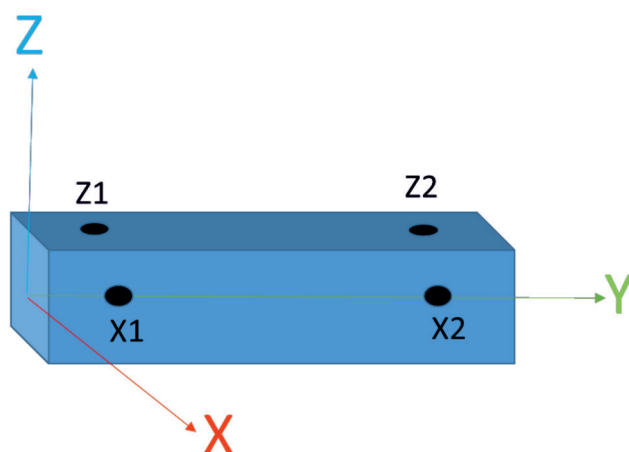


Рис. 8. Точки контроля геометрического положения модулей системы регистрации

Fig. 8. Check points of the registration system modules geometric position

Отдельно стоит рассмотреть геометрический контроль блока системы регистрации излучения. Корпус блока представляет собой куб. На время сборки фронтальная сторона корпуса убирается для проведения измерений. Внутри корпуса устанавливаются модули системы регистрации габаритом 32×32 мм. Всего в блоке системы устанавливается 64 модуля. Для ориентирования системы координат внутри корпуса фиксировалось положение его трех взаимно перпендикулярных плоскостей. Точка пересечения этих плоскостей являлась начальной для контроля положения первого модуля. В дальнейшем центр системы переносили на ось каждого модуля. Контроль положения осуществлялся по четырем точкам на модуле, как показано на рис. 8. После установки всех модулей производилась съемка геодезических знаков, установленных на фронтальной грани корпуса, при помощи которых корпус устанавливается на оптическую ось соответствующего ракурса при его монтаже.

Монтаж элементов ускорителя ЛИУ-20

После ориентирования системы координат в залах была произведена разметка проекции оптической оси пучка на пол и отмечены места крепления гирдеров к полу. Координаты крепления опор к полу берутся из конструкторской документации. Данные этапы, а также описания вариантов гирдерных модулей описаны в работах [4; 5].

Расчетная траектория представляет собой набор точек, которые являются пересечением оси пучка с торцевыми плоскостями элементов ускорителя. В центре элемента создается локальная система координат с ориентацией осей, идентичной локальной системе при паспортизации данного элемента. После этого импортируются данные каталога координат из паспорта. Таким образом положение геодезических знаков из локальной системы элемента переносится в общую систему координат ускорительного комплекса [5].

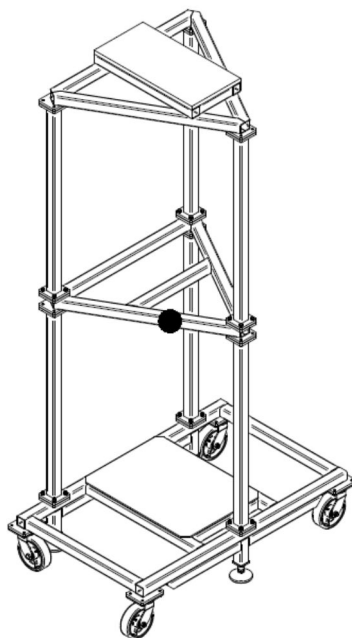


Рис. 9. Общий вид на подставку лазерного трекера
для проведения работ в ускорительном зале
Fig. 9. Laser tracker stand general view

При существующей компоновке в ускорительном зале физическое оборудование перекрывает левую сторону помещения примерно до уровня четырех метров от пола. При этом геодезические знаки, установленные на этой стороне помещения, располагаются выше уровня габарита оборудования, однако находятся вне зоны видимости лазерного трекера, установленного на стандартный штатив. Для проведения установки в проектное положение элементов ускорителя в данном зале была разработана специальная перемещаемая платформа (рис. 9), превышающая высоту габарита оборудования и позволяющая обеспечить видимость между установленным на ней лазерным трекером и геодезическими знаками на выбранном участке работ. Для фиксации и возможности горизонтирования прибора платформа имеет три отжимные опоры.

Геодезический мониторинг в помещении ускорителя ЛИУ-20

На данный момент проведено шесть циклов измерений опорной геодезической сети. При проведении геодезических измерений особые затруднения вызывает определение взаимного пространственного положения изолированных помещений, таких как зал разводки пучка, ускорительный зал и здание системы регистрации. Проведение оптических измерений между залами ускорителя и разводкой пучка усложнено конфигурацией оборудования и отсутствием возможности закрепления геодезических знаков для создания надежной передачи координат из зала в зал. Для оптимизации процесса геодезических измерений проект помещений ускорительных комплексов должен включать специальные решения, обеспечивающие видимость между всеми помещениями, в которых располагается контролируемое оборудование.

На рис. 10 приведены величины изменения пространственного положения геодезических знаков сети на стенах залов ускорителя ЛИУ-20 вдоль осей Y и Z относительно цикла 2018 года.

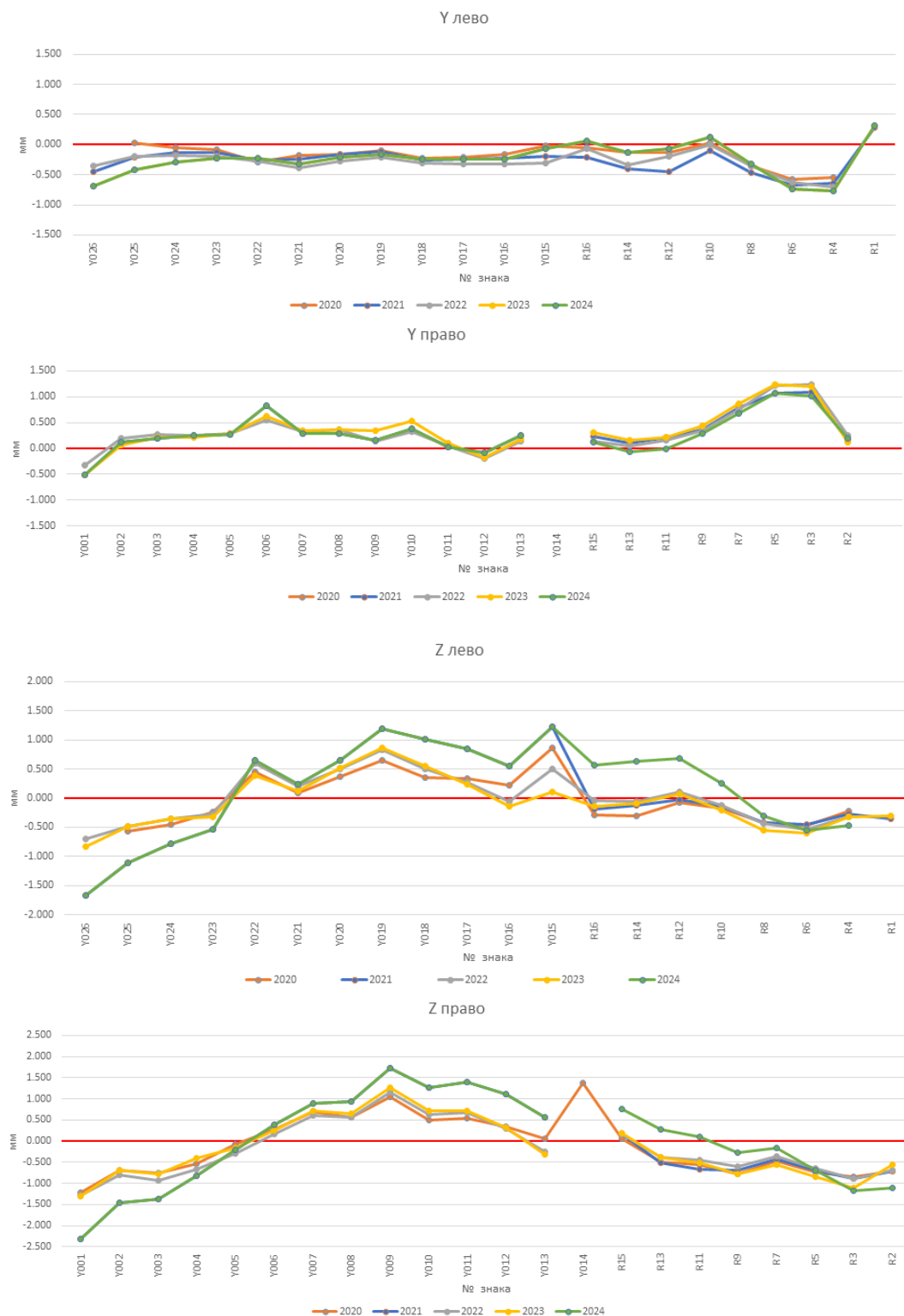


Рис. 10. Графики изменения пространственного положения настенных геодезических знаков опорной сети ЛИУ-20 (нуль соответствует положению знаков в 2018 году)

Fig. 10. Spatial changes graphs of wall-positioned geodetic signs of the LIA-20 reference network (zero-values correspond to the signs positions in 2018)

Можно заметить изменение в промежутке между знаками Y013-R15 на правой части и Y016-R16 на левой части здания. На этом промежутке находится переход между ускорительным залом и залом разводки пучка. После измерений в 2020 году знак Y014 стал недоступен для измерений. Наибольшие смещения наблюдаются в цикле 2024 года, это может быть обусловлено вводом в эксплуатацию ускорительного комплекса и проведением работ, оказывающих воздействие на несущие конструкции сооружения и подстилающие грунты. Величины, характеризующие диапазон деформаций опорной геодезической сети по каждой координате за период с 2018 по 2024 год, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон деформации сети за 6 лет наблюдений

Table 2

The network deformation range over 6 years of monitoring

Значение	ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм
Максимальное	1,139	1,083	1,723
Минимальное	-1,918	-2,053	-2,497
Общее	3,057	3,136	4,221

В ходе проведения измерений лазерным трекером опорной сети была определена зависимость качества измерений от приведения прибора к горизонту на станции. Для лазерных трекеров API необходимо наличие ежегодной поверки электронного уровня, а также использование функции Virtual Level на каждой станции измерения.

Перспективы развития и промежуточные итоги

Реализованный подход геодезического сопровождения является распространенным для подобных установок во всем мире. Несмотря на это, имеются определенные особенности, такие как фиксация системы координат с учетом пространственного положения выходов девяти ракурсов, высотное расположение станций лазерного трекера для обеспечения видимости знаков сети, затрудненная оптическая связь между зданием ускорителя и зданием системы регистрации.

Дальнейшим развитием комплекса будет монтаж оставшихся семи ракурсов, оборудование четырех из которых частично имеет не нулевые координату Z и угол разворота в вертикальной плоскости. Это потребует развития системы геодезического обеспечения для успешной реализации проекта.

Список литературы

1. Spatial Analyzer. User manual [Electronic resource]. URL: <https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/2023.2%20Documents/SA%20User%20Manual.pdf>
2. Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Сердаков Л. Е. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров // Геодезия и картография. 2017. Т. 78, № 5. С. 2–6.
3. Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Буренков Д. Б., Сердаков Л. Е. Геодезическое обеспечение проектирования, строительства, эксплуатации и мониторинга ускорительно-накопительных комплексов: моногр. Новосибирск, 2021.
4. Никифоров Д. А. Исследование динамики пучка электронов в мощном линейном индукционном ускорителе с фокусировкой на сосредоточенных элементах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2023. 94 с.

5. **Буренков Д. Б. и др.** Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II // Геодезия и картография. 2013. № 6. С. 13–16.

References

1. Spatial Analyzer. User manual [Electronic resource]. URL: <https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/2023.2%20Documents/SA%20User%20Manual.pdf>
2. **Murzintsev P. P., Polyansky A. V., Serdakov L. E.** On the optimization of reference geodetic ring networks of accelerators using laser trackers. *Geodesy and Cartography*, 2017, vol. 78, no. 5, pp. 2–6. (in Russ.)
3. **Murzintsev P. P., Polyansky A. V., Burenkov D. B., Serdakov L. E.** Geodetic support for the design, construction, operation and monitoring of accelerator-storage complexes. Monograph. Novosibirsk, 2021. (in Russ.)
4. **Nikiforov D. A.** Study of the dynamics of an electron beam in a powerful linear induction accelerator with focusing on lumped elements: dissertation of candidate of physical and mathematical sciences. Novosibirsk: BINP SB RAS, 2023. 94 p. (in Russ.)
5. **Burenkov D. B. et al.** Geodetic support for the NSLS-II booster creation. *Geodesy and Cartography*, 2013, no. 6, pp. 13–16. (in Russ.)

Сведения об авторах

Сердаков Леонид Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Полянский Андрей Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Бак Петр Алексеевич, старший научный сотрудник

Вонда Елена Сергеевна, инженер

Крапивин Владимир Сергеевич, старший инженер

Живанков Кирилл Игоревич, научный сотрудник

Полозова Полина Алексеевна, старший лаборант

Никитин Олег Альфредович, доктор технических наук, начальник отдела

Ахметов Александр Рамзисович, начальник лаборатории

Пензин Илья Владимирович, инженер-исследователь специзделий 2-й категории

Information about the Authors

Leonid E. Serdakov, Ph.D., Senior Staff Scientist, BINP SB RAS

Andrey V. Polyansky, Ph.D., Senior Staff Scientist, BINP SB RAS

Petr A. Bak, Senior Staff Scientist, BINP SB RAS

Elena S. Vonda, Engineer of Geodesy, BINP SB RAS

Vladimir S. Krapivin, Senior Engineer of Geodesy, BINP SB RAS

Kirill I. Zhivankov, Scientist, BINP SB RAS

Polina A. Polozova, Senior Lab Assistant, BINP SB

Oleg A. Nikitin, Head of Department, RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin

Alexander R. Akhmetov, Head of Laboratory, RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin

Ilya V. Penzin, Research Engineer, RFNC – VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin

*Статья поступила в редакцию 28.08.2025;
одобрена после рецензирования 16.10.2025; принята к публикации 07.11.2025*

*The article was submitted 28.08.2025;
approved after reviewing 16.10.2025; accepted for publication 07.11.2025*