

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Сердаков Леонид Евгеньевич



Разработка методики геодезического обеспечения
для монтажа технологического оборудования источников
синхротронного излучения

25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Мурзинцев Петр Павлович

Новосибирск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ МЕТОДИК ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА.....	9
1.1 Общие сведения об ускорительно-накопительных комплексах	9
1.2 Проектирование ускорительно-накопительных комплексов	12
1.3 Анализ используемых стратегий геодезического обеспечения при создании и эксплуатации ускорительных комплексов в России	17
1.4 Геодезическое обеспечение модернизации источника синхротронного излучения 4-го поколения ESRF-EBS.....	21
1.5 Общие сведения о специальных геодезических сетях для установки элементов ускорительно-накопительного комплекса	29
1.6 Постановка задачи исследования и выводы по первому разделу	42
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СЕКТОРОВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	44
2.1 Исследования внутренней сходимости лазерных трекеров API RADIANT и Leica AT 400-й серии.....	44
2.2 Алгоритм вычисления секторов измерений со станции лазерного трекера с учетом допусков на установку технологического оборудования на кольцевую ось.....	50
2.3 Выводы по второму разделу	56
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОНТАЖА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	57
3.1 Алгоритм расчета проектных координат специальной геодезической сети ускорительно-накопительного комплекса.....	57

3.2 Исследования по выбору программных продуктов для математической обработки специальной геодезической сети ускорительно-накопительного комплекса.....	66
3.2.1 Программный продукт Spatial Analyzer.....	66
3.2.2 Программный продукт PANDA.....	73
3.2.3 Исследование результатов уравнивания геодезических измерений программными продуктами Spatial Analyzer и PANDA.....	76
3.3 Выбор оптимального варианта геодезической сети на основе алгоритма разработанной методики в программном продукте Spatial Analyzer.....	79
3.4 Выводы и рекомендации по третьему разделу	89
4 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ	90
4.1 Основные сведения об источнике синхротронного излучения СКИФ.....	90
4.2 Реализация методики геодезического обеспечения для источника СИ четвертого поколения СКИФ	93
4.3 Выводы по четвертому разделу	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное).....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное).....	117

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований. 1 декабря 2016 г. Указом Президента Российской Федерации № 642 утверждена стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, которой предусмотрена поддержка создания и использования уникальных научных установок класса «Мегасайенс» – крупных исследовательских инфраструктур на территории России. Стратегия подразумевает участие российских ученых и исследовательских групп в международных проектах, обеспечивающих доступ к новым компетенциям и ресурсам организации, исходя из национальных интересов Российской Федерации.

В Российской Федерации строительство крупных ускорительных комплексов не осуществлялось уже около 25 лет. Поэтому для реализации стратегии научно-технологического развития необходимо разработать новые, более эффективные подходы к проектированию, контролю и эксплуатации таких уникальных инженерных сооружений и технологических комплексов. Следовательно, для реализации этих масштабных проектов необходимо разработать методику соответствующего геодезического обеспечения.

Ключевым аспектом для геодезического обеспечения проектирования и строительства таких комплексов является создание специальной геодезической сети и выполнение работ для установки технологического оборудования в проектное положение.

Допуски на установку элементов структуры современных ускорителей находятся в диапазоне 0,05–0,1 мм. Данные требования находятся на границе возможной достижимой точности геодезических измерений современных лазерных треке-ров. Кроме того, при создании УНК в уже существующих тоннелях и зданиях возникают задачи по модернизации или созданию новой специальной геодезической сети (Бустер коллайдера NICA в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна; Европейский синхротрон (ESRF), г. Гренобль, Франция; Большой Адронный Коллайдер (LHC) , г. Женева, Швейцария). Поэтому разработка методики

геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения четвертого поколения является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Исследованиями построений геодезических сетей для уникальных инженерных сооружений занимались такие специалисты, как Боков М. А., Горелов В. А., Рязанцев Г. Е., Лебедев Н. Н., Марфенко С. В., Новак В. Е., Конусов В. Г., Ямбаев Х. К., Пупков Ю. А. и известные зарубежные ученые – Жервез Ж., Гартнер В.

Большой вклад в развитие высокоточных геодезических измерений внесли отечественные ученые Асташенков Г. Г., Большаков В. Д., Бывшев В. А., Васютинский Ю. И., Жуков Б. Н., Брынь М. Я., Щербаков В. В., Ключин Е. Б., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Пискунов М. Е., Уставич Г. А., Хорошилов В. С., Пимшин Ю. В.

В России современные исследования в области прикладной геодезии для обеспечения работ на ускорительно-накопительных комплексах проводят Буренков Д. Б., Лавриненко Е. Д., Полянский А. В., за рубежом – Мартин Д., Миссан Д., Фуш Ж. Ф., Хаблин М.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключалась в разработке, исследовании и реализации методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения на примере Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *научно-технические задачи*:

– выполнить анализ отечественного и зарубежного опыта геодезического обеспечения создания уникальных ускорительно-накопительных комплексов;

– выполнить исследования влияния расстояний на параметры эллипсоидов погрешностей положения отражателя при производстве геодезических измерений лазерными трекерами API Radian и Leica AT 400 серии;

– разработать алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерных трекеров, с учетом заданного допуска на установку технологического оборудования и радиуса ускорительно-накопительного комплекса;

– разработать методику геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения;

– провести экспериментальное исследование разработанной методики геодезического обеспечения для установки элементов магнитной структуры источника синхротронного излучения (СИ) 4-го поколения СКИФ.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований является источник синхротронного излучения – Сибирский кольцевой источник фотонов.

Предметом исследования является методика геодезического обеспечения для создания ускорительно накопительных комплексов.

Научная новизна. Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

– предложен алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерного трекера, позволяющий с заданным допуском осуществлять установку уникального технологического оборудования в проектное положение для различных радиусов кольцевой оси;

– разработана методика геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования ускорительно-накопительных комплексов, позволяющая на этапе проектирования определить оптимальное количество знаков специальной геодезической сети, их расположение в тоннеле и на технологическом оборудовании, а также количество станций лазерного трекера;

– разработан проект специальной геодезической сети для монтажа технологического оборудования уникального ускорительно-накопительного комплекса 4-го поколения СКИФ, первого в Российской Федерации.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость выполненного исследования заключается в разработке алгоритма определения пространственного положения и количества знаков

и станций лазерного трекера для моделирования вариантов построения специальной геодезической сети, позволяющей создать единую координатную систему ускорительно-накопительного комплекса.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в определении оптимального варианта построения специальной геодезической сети, позволяющего с учетом спектральной чувствительности ускорительного комплекса устанавливать уникальное технологическое оборудование в проектное положение с заданной точностью.

Методология и методы исследований. В диссертационной работе использовались методы аналитической геометрии, метод наименьших квадратов, генератор нормально распределенных случайных чисел с преобразованием Бокса – Мюллера, методы гармонического анализа, а также программные комплексы Spatial Analyzer, PANDA.

Положения, выносимые на защиту:

– разработанный алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерного трекера, позволяющий увеличить эффективность применения путем определения диапазонов, выраженных в угловой мере, в которых соблюдается допуск на установку технологического оборудования в проектное положение;

– разработанная методика и созданный на ее основе проект специальной геодезической сети для Сибирского кольцевого источника фотонов позволяет создать геодезическое обоснование с параметрами, обеспечивающими установку уникального технологического оборудования в проектное положение с заданными нормативными допусками.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика и содержание диссертации соответствуют области исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и

эксплуатации нефтедобывающих комплексов; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты исследований, выводы и практические рекомендации по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск) в 2016 и 2019 гг. и областном конкурсе «Научный потенциал студентов и молодых ученых Новосибирской области» в 2016 г.

Разработанная методика геодезического обеспечения использовалась при модернизации источника синхротронного излучения ESRFEBS (г. Гренобль, Франция) в реализуемом проекте при участии Института ядерной физики СО РАН при создании CR, входящего в комплекс ускорителей FAIR (г. Дармштадт, Германия), в коллайдере NICA ОИЯИ (г. Дубна), при проектировании коллайдера СТ-фабрика, источника СИ 4-го поколения СКИФ.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований представлены в десяти научных работах, пять из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, одна статья опубликована в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 117 страниц печатного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований, содержит 10 таблиц, 73 рисунка, 3 приложения.

1. АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ МЕТОДИК ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

1.1 Общие сведения об ускорительно-накопительных комплексах

Ускорители заряженных частиц – основной источник экспериментальных данных физики высоких энергий. Конструктивно различают циклические и линейные ускорители. Современные циклические ускорители по своему назначению подразделяются на два основных типа: экспериментальные физические установки – коллайдеры – и прикладные – источники синхротронного излучения.

Пучок частиц, не испытывающий никаких возмущений на своем пути, движется по так называемой равновесной орбите. В реальности таких условий достичь невозможно, так как при движении в магнитных полях оптической структуры ускорителя пучок испытывает поперечные колебания, называемые бетатронными. Движение частиц в ускорителе описывается в цилиндрической системе координат (рисунок 1.1). Радиальным (R) называется положение частиц, лежащих в медианной плоскости оптической структуры. Горизонтальной называть эту плоскость строго нельзя, так как в некоторых ускорителях она располагается под разными углами или вертикально (как например, в одном из первых ускорителей ВЭП-1) [33, 100]. Положение частиц, перпендикулярное медианной плоскости равновесной орбиты, называется вертикальным (Z). Продольное движение вдоль равновесной частицы называется азимутальным (S).

Следует отметить, что обычно равновесная орбита представляет собой не кольцевую замкнутую траекторию, а совокупность кривых, соединённых касательными [37].

Заряженный пучок в ускорителе описывают координатами центра масс группы частиц. Система координат описывает равновесную орбиту движения частиц. Пучок, движущийся вдоль оси S , характеризуется положением центра масс со среднеквадра-

тичными поперечными размерами σ_r , σ_z и продольным σ_s , (рисунок 1.2). Важным параметром любого ускорителя является эмиттанс, объем фазового пространства, внутри которого находится 95 % частиц (2σ). На величину эмиттанса влияют геометрические размеры пучка и импульсов частиц. Измеряется в мм·мрад [70].

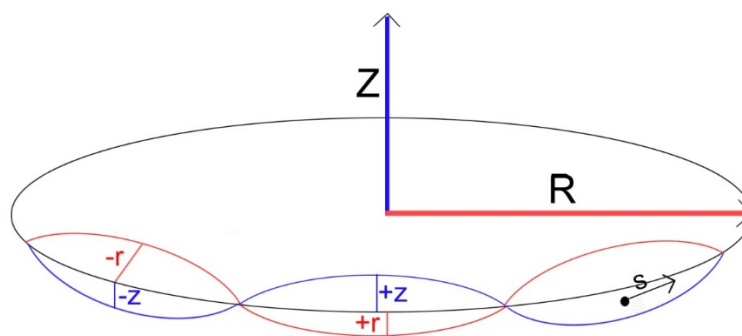


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение движение пучка частиц относительно равновесной орбиты

Коллайдеры – установки, в которых заряженные частицы получают высокую кинетическую энергию и сталкиваются в определенных местах, где с помощью специальных детекторов фиксируются продукты их распада. Существует два типа коллайдеров. В случае, если пучки частиц одинаковы по массе, но разные по заряду, они движутся друг навстречу другу по одной вакуумной камере, и их траектория корректируется одной оптической структурой [74]. Если частицы имеют одинаковый заряд и разные массы, реализация такого типа коллайдера представляет собой две ускорительных орбиты, пересекающихся в определенных местах (рисунок 1.3).

Важным параметром любого коллайдера является светимость – характеристика, показывающая количество взаимодействий частиц встречных пучков за единицу времени.

Источники синхротронного излучения – циклические ускорители заряженных частиц, предназначенные для генерации синхротронного излучения. Синхротронное излучение – магнитотормозное излучение, испускаемое частицами, движущимися со скоростями, близкими к скорости света, в результате воздействия на них магнитного поля при движении по круговой орбите.

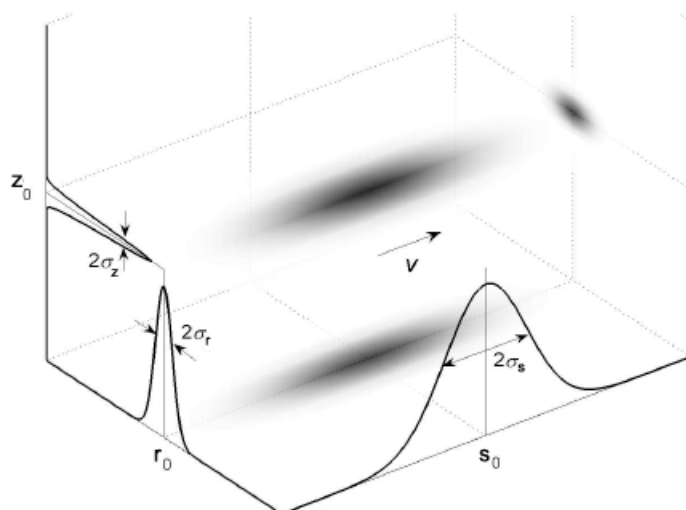


Рисунок 1.2 – Пучок частиц в системе координат равновесной орбиты ускорителя

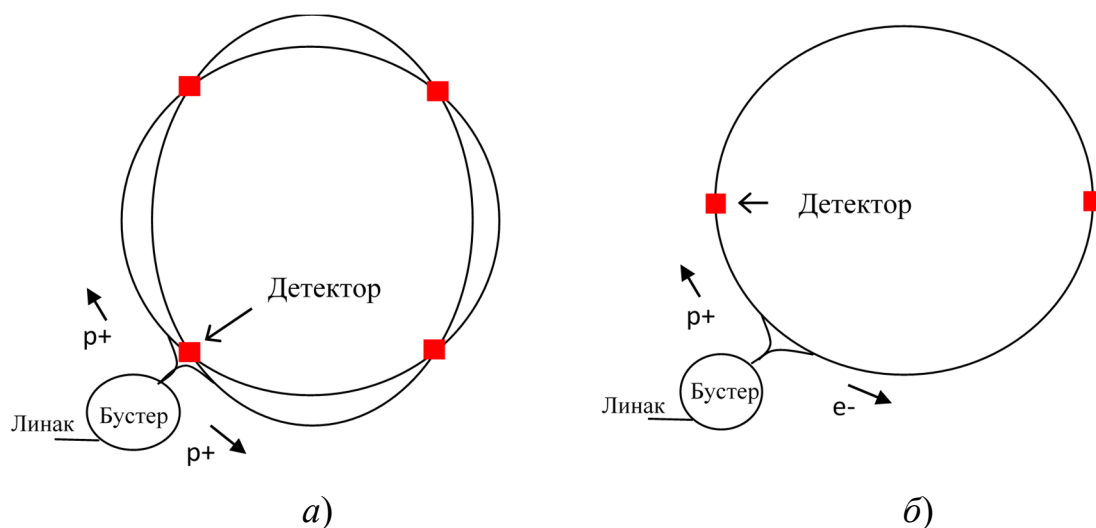


Рисунок 1.3 – Две схемы реализации коллайдеров:

- a) встречные протон-протонные или электрон-антипротонные пучки;
- б) встречные электрон-позитронные или протон-антипротонные пучки

Лазеры на свободных электронах – современные установки для генерации пучка электронов посредством периодической системы отклоняющих полей (ондуляторы) [102,116,117].

Геометрически синхротронное излучение можно представить в виде плоского «веера», исходящего по касательной к круговой орбите движения частицы. На каждом источнике СИ проектируется ширина канала, формирующая отбор излучения.

Через эту формирующую проходят лучи с дуги $\Delta\theta$ на орбите пучка; ψ – угол вертикальной расходимости пучка. Чем больше энергия, тем меньше расходимость перпендикулярно плоскости орбиты (рисунок 1.4) [91].

Источники СИ 4-го поколения, отличаются от своих предшественников малым эммитансом 100–10 пм. В настоящее время функционируют или находятся в стадии запуска несколько таких циклических источников СИ (MAX-IV – Швеция, EBS-ESRF – Франция, Sirius – Бразилия). К 4-му поколению будет относиться проектируемый СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов).

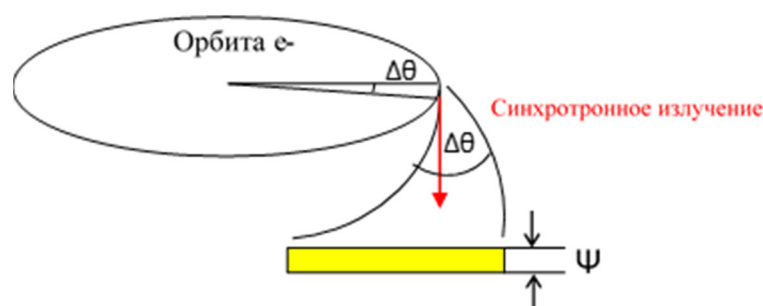


Рисунок 1.4 – Геометрическая интерпретация распределения синхротронного излучения в плоскости орбиты и перпендикулярно ей

Подавляющее большинство современных циклических ускорителей заряженных частиц состоят из линейного ускорителя (линак); бустера (одного или нескольких предускоряющих колец) и основного ускорителя. Все эти ускорители соединены каналами транспортировки пучка.

1.2 Проектирование ускорительно-накопительных комплексов

Основополагающими характеристиками при проектировании любого ускорительно-накопительного комплекса являются параметры пучка частиц. Далее определяют градиенты полей и длины электромагнитов, апертуру вакуумной камеры и т. д.

Динамическое моделирование оптической структуры позволяет определить оптимальные магнитные поля и их силы, необходимые для достижения проектных параметров пучка. В работах Ю. А. Пупкова [63, 64] рассматривается метод расчета искажений орбиты пучка. Матрица искажений орбиты определяется как:

$$A_{ij} = \frac{G_j \cdot l_j \cdot \cos \nu (\pi + \theta_i - \theta_j)}{2B \cdot \nu \cdot \sin \pi \nu}; \quad (1.1)$$

$$\theta_i = \frac{S_i}{R}, \quad (1.2)$$

где G , l – градиент поля и длина j – элемента структуры; ν – бетатронная частота ускорителя; B – корреляционная матрица погрешностей положения элементов; S – расстояния между последовательно расположенными элементами, где i – элемент, условно принятый за начальный; R – средний радиус орбиты.

Матрица A с погрешностью в 30 % позволяет производить проектирование оптической структуры ускорительно-накопительного комплекса [111].

Важным этапом проектирования ускорительного комплекса является расчет спектральной чувствительности замкнутой орбиты к погрешностям элементов оптической структуры, допущенными при установке в проектное положение геодезическими средствами. Спектральная чувствительность позволяет определить опасные гармоники возмущения – резонансные раскочки амплитуд бетатронных колебаний.

Расчет допустимых искажений равновесной орбиты необходим для определения величин допусков на изготовление электромагнитных элементов ускорителя и их установки в проектное положение на объекте эксплуатации [92]. Допустимая погрешность установки последовательно расположенных сильнофокусирующих элементов (квадруполей) определяется по формуле

$$m_{\text{квадруполь}} = \frac{D \cdot L \cdot \sqrt{2 \sin \pi \nu}}{5 \cdot \sqrt{\beta C}}, \quad (1.3)$$

где D – апертура вакуумной камеры; L – расстояние между соседними квадруполями; β – максимальная длина бетатронной волны; C – периметр ускорителя.

Величины, полученные по формуле (1.3), обычно меньше 0,05 мм, что лежит на грани достижимых точностных возможностей современных геодезических средств измерений при установке в проектное положение. Поэтому в оптическую структуру

ускорителей включают корректирующие элементы, позволяющие изменять орбиту пучка в диапазоне $\sim 0,25$ мм на длине между корректором и линзой [61].

Когда выбранная конфигурация оптической структуры позволяет обеспечивать заданные параметры пучка частиц, на основании результатов математического моделирования выбирают схему взаимной установки элементов ускорителя. В зависимости от типа и габаритов электромагнитов формируется подход к технологии установки в проектное положение (рисунок 1.5).

Существует два основных типа электромагнитов: классический – конструктивно состоящий из ферромагнитного сердечника и обмотки, по которой протекает электрический ток; сверхпроводящий – состоящий из материалов, которые при охлаждении до очень низких температур (1,9 К), приобретают сверхпроводящие свойства.

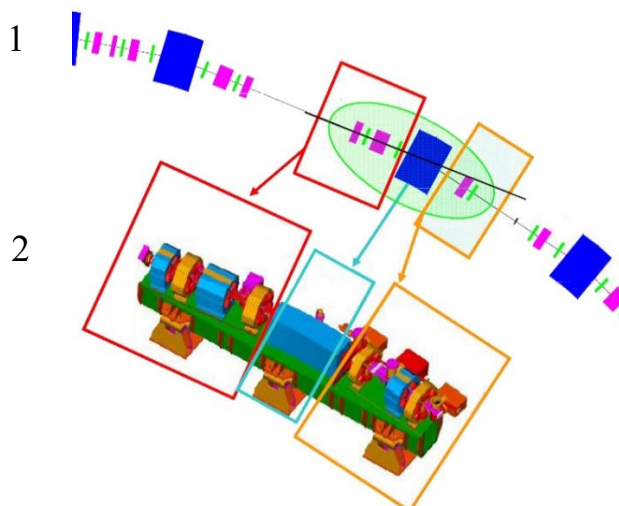
Установка элементов в проектное положение в тоннеле ускорителя в основном базируется на двух подходах:

- индивидуальный – каждый элемент устанавливается на свою металлоконструкцию;
- модульный – группа последовательно расположенных элементов устанавливается на единую основу – гирдер [52].

Существуют оригинальные решения позиционирования элементов. На электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М магнитная структура закреплена на потолке тоннеля.

Вариант индивидуальной подставки используют при больших массогабаритных параметрах элемента. Также при монтаже ускорителей, структура которых состоит из сверхпроводящих магнитов, используют подставки как элемент несущей конструкции (рисунок 1.6).

В источниках синхротронного излучения последнего поколения принят модульный принцип установки. Такой подход упрощает монтаж, так как на одном гирдере находится группа уже установленных на ось пучка элементов. Установка элементов таким способом описана в 1.4.



1 – принятая оптическая структура ускорителя после математического моделирования; 2 – предложенный вариант установки элементов на гирдере

Рисунок 1.5 – Концепция установки группы элементов оптической структуры на примере источника СИ ALBA (Испания)

Также важным моментом в ходе проектирования ускорительно-накопительного комплекса является геологическая изученность местности, на которой будет производиться строительство. От этого зависит выбор типа фундамента, который будет обеспечивать стабильность положения всего комплекса. Общепринятой является установка оборудования источников синхротронного излучения на едином фундаменте, который не связан с основанием стен здания [54, 56].

По результатам сейсмической изученности района определяют частоты грунтовых вибраций [14, 76–78]. При внешнем воздействии (грунтовые вибрации, движение воды в охлаждающих патрубках магнитных элементов и прочее) в системе «элемент – гирдер» возникают сложные колебания, состоящие из возмущающей и собственной частот. Эти колебания негативно влияют на орбиту пучка при эксплуатации. Для определения влияния на систему возмущающей частоты существует понятие коэффициента динамичности ($\varepsilon_{к.д.}$). Определяется он по формуле:

$$\varepsilon_{к.д.} = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{\omega^2}{\rho^2} \right) \right|}, \quad (1.4)$$

где ω – частота возмущения; ρ – собственная частота системы.



а)

б)

Рисунок 1.6 – Подставки для элементов ускорителя: а) подставки для сверхпроводящих магнитов Нуклотрона (ОИЯИ, г. Дубна); б) подставки для электромагнитов ускорителя SPS, входящего в комплекс большого адронного коллайдера

Коэффициент динамичности зависит только от соотношения ω/ρ . На графике (рисунок 1.7), представлена зависимость системы «гирдер – элемент», выраженной через коэффициент динамичности $\epsilon_{к.д.}$ от изменений результирующих колебаний. Значение $\epsilon = 1$ указывает на статическое положение системы. При равном значении собственной и возмущающей частот система входит в резонанс, что опасно для конструкции. При достаточно больших значениях ω/ρ система не успевает реагировать на быстрые изменения высокочастотной возмущающей силы.

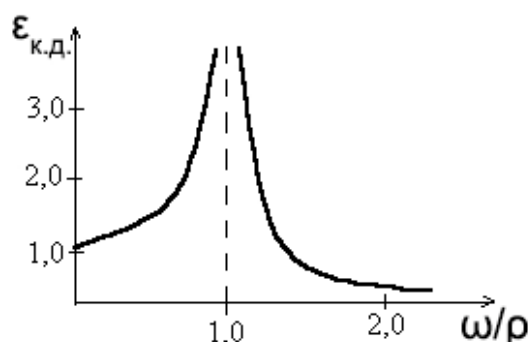


Рисунок 1.7 – График зависимости коэффициента динамичности от соотношения ω/ρ

Практика проектирования показывает, что система «гирдер – элемент» должна иметь первую собственную частоту > 20 Гц, чтобы не возникло резонанса от грунтовых колебаний [119].

1.3 Анализ используемых стратегий геодезического обеспечения при создании и эксплуатации ускорительных комплексов в России

Россия является одной из первых стран, начавшей разработку и создание ускорителей частиц. Разработка магнитной структуры ускорителей с жесткой фокусировкой пучка определила необходимость обеспечить высокоточное взаимное положение элементов. Были проведены масштабные исследования в области высокоточных измерений для определения методик установки технологического оборудования в проектное положение и дальнейшего геодезического мониторинга в процессе эксплуатации [8, 30, 50].

Специалистами инженерной геодезии в области строительства ускорительно-накопительных комплексов были сформулированы основные этапы работ:

- составление проекта производства геодезических работ;
- создание опорной геодезической сети;
- создание разбивочной сети;
- разбивочные работы по выносу осей и отдельных узловых точек;
- осуществление контрольных геодезических измерений;
- исполнительные съемки монтажно-строительных работ;
- наблюдение за осадками и деформациями [1].

Рассмотрим геодезические работы при производстве и монтаже элементов структуры ускорительных комплексов, созданных в России: Серпуховского ускорителя У-70, Ереванского синхротрона и электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-4.

Магнитная структура Серпуховского ускорителя У-70 с жесткой фокусировкой состоит из 12 суперпериодов, в каждом находится 6 стандартных и 4 укороченных последовательно расположенных фокусирующих и дефокусирующих электро-

магнитов. В промежутках между электромагнитами располагаются ускоряющие секции, участки ввода-вывода и системы диагностики пучка.

Каждый С-образный электромагнит состоит из пяти блоков (рисунок 1.8). Блок состоит из листов кремнистой стали толщиной 2 мм. На верхнем и нижнем полюсах магнита установлена общая для пяти блоков обмотка. Между полюсами смонтирована вакуумная камера овального сечения 12 x 20 сантиметров. Вес электромагнита 200 т.



Рисунок 1.8 – Монтаж электромагнитов в тоннеле ускорителя У-70

Подход к многоблочной схеме изготовления электромагнитов ускорителей был определен разбросом магнитных характеристик структуры ускорителя. Расположение блоков выбирали из критерия наименьшего возмущения на орбиту пучка.

Ускоритель расположен в тоннеле со средним радиусом 236 м. Сечение прямоугольного тоннеля имеет габариты 13 x 11,5 м. Фундамент – железобетонные опоры, соединенные между собой мостовыми балками. Каждая балка имеет юстировочные узлы. На балку установлен электромагнит.

На каждом блоке устанавливались два «орбитальных» геодезических знака. Крайние знаки на крайних блоках являются опорными для электромагнита [40].

Васютинским И. Ю. [1] описаны основные работы геодезического контроля при сборке крупномассогабаритных электромагнитов на стадии производства на мостовой балке:

- контроль установки взаимного положения пакетов электротехнической стали в блоке в поперечном горизонтальном и вертикальном направлениях оси пучка;
- контроль установки взаимного положения блоков электромагнита в поперечном горизонтальном и вертикальном направлениях оси пучка;
- контроль установки блоков в продольном направлении оси пучка;
- установка геодезических знаков;
- исполнительная съемка положения блоков электромагнита и геодезических знаков (паспортизация).

Магнитная структура Ереванского синхротрона включает в себя электромагниты, состоящие из двух частей – фокусирующей и дефокусирующей. Всего 48 электромагнитов с весом 16 т каждый.

Ускоритель размещался в специальном кольцевом здании с радиусом 34,5 м. Все электромагниты размещались на отдельных железобетонных фундаментах. Для юстировки элементов ускорителя в проектное положение имелись микрометрические регулировочные устройства.

Установка геодезических знаков на электромагнитах Ереванского синхротрона производилась после их сборки. Основное предназначение геодезических знаков – высокоточная установка на стенде магнитных измерений для определения поперечных и продольных поправок. Эти поправки в дальнейшем используются для корректировки положения электромагнитов при монтаже в здании ускорителя [96].

Каждый электромагнит коллайдера ВЭПП-4 состоит из двух частей: фокусирующей или дефокусирующей и радиусной части. Всего в двух полукольцах установлено 76 дипольных магнита. Каждый элемент структуры имел два геодезических знака в медианной плоскости орбиты пучка и фиксировал положение магнитной оси [33].

Тоннель представляет собой два полукольца с радиусом 45,5 м и две прямолинейные вставки – технического и экспериментального промежутков.

Проектами геодезического обеспечения занимался коллектив ученых МИИ-ГАиК. Основой для монтажа элементов является опорная геодезическая сеть. Магнитная структура располагается над пунктами специальной сети. Плановая установка в проект производится с помощью высокоточных центриров. Разработанный Новак В. Е центрир-высотомер позволял центрировать оборудование с погрешностью, не превышающей 0,025 мм. Установка элементов ускорителя по высоте осуществлялась методом высокоточного геометрического нивелирования с короткими визирными лучами. Погрешность определения высот на длине 10 м 0,03–0,05 мм [97].

Создание ускорительных комплексов в 60-70-х гг. XX в. показало высокий уровень научно-технического развития в СССР, в частности в области геодезического обеспечения строительства прецизионных сооружений. В период 1980-90 гг. в стране были создан сильнофокусирующий синхротрон Нуклотрон в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) и модернизирован коллайдер ВЭПП-4. В результате экономического кризиса в стране и распада СССР было приостановлено создание комплекса УНК Института физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино).

Основные требования к проектируемым сетям ускорительных комплексов были сформулированы Лебедевым Н. Н.:

- конструкция знаков, точность определения координат и оперативность измерений должны решать все геодезические задачи на данном объекте;
- знаки сети должны сохранять значения координат в течение значительного промежутка времени;
- знаки и схема измерений должны иметь удобное расположение для производства геодезических работ;
- стоимость создания сети не должна быть высокой;
- временные затраты на математическую обработку сети должны быть минимальны.

В 2000-х гг. лазерные трекеры заменяют большинство старой инструментальной базы. Заметно сокращаются временные затраты на производство геодезических работ в периоды профилактических остановок комплексов. Полянским А. В. и соавторами описаны основные этапы геодезического обеспечения при реализации проекта NSLS-II (США) с учетом актуальных технологических решений [9].

Создание в России новых ускорительных комплексов (коллайдер NICA, ОИЯИ, г. Дубна; источник СИ СКИФ, г. Новосибирск) требует разработки методики создания геодезического обеспечения с учетом полученного отечественного и зарубежного опыта эксплуатации прецизионных сооружений.

1.4 Геодезическое обеспечение модернизации источника синхротронного излучения 4-го поколения ESRF-EBS

Реализация проекта ускорительно-накопительного комплекса является сложной и уникальной научно-технической задачей. Стратегия геодезического сопровождения формируется с учетом специфики каждого объекта. На примере модернизации источника СИ ESRF до 4-го поколения рассмотрим современный зарубежный подход к задачам геодезического сопровождения.

Европейский источник СИ (European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)) – один из самых высокоэнергетических в мире. Ускоритель работает с 1994 г. в круглосуточном режиме. Ежегодно на каналах вывода СИ проводят свои эксперименты около 7 000 ученых со всего мира.

С 2015 г. стартовал проект модернизации источника СИ ESRF – EBS (Extremely Brilliant Source). Предполагается использовать 90 % существующей инфраструктуры. Периметр кольца составит 843,9 м. Модернизация позволит увеличить физические параметры пучка частиц во много раз. В рамках контракта ESRF с Институтом ядерной физики имени Г. И. Будкера автор диссертации принимал участие в работах по гирдерной сборке [65].

Геодезическое сопровождение требуется на всем этапе модернизации. Основные виды работ, в которых принимает участие геодезическая группа ESRF (ALGE):

- магнитные измерения (fiducialisation);
- горизонтирование гирдеров на сборочной линии;
- измерение базовых плоскостей гирдеров для создания локальной системы координат (ЛСК);
 - определение базовых поверхностей датчиков положения пучка (ВРМ) для создания ЛСК и передачи координат на реперные знаки;
 - установка системы диагностики и других элементов вакуумной камеры в проектное положение на этапе сборки;
 - установка в проектное положение магнитных элементов источника СИ в локальной системе координат гирдера;
 - установка в проектное положение вакуумной камеры в локальной системе координат гирдера;
 - контроль положения магнитных элементов на гирдере после установки вакуумной камеры.

Ускорительная секция источника СИ ESRF – EBS состоит из четырех гирдеров с установленными магнитными элементами на них. Всего в кольце ускорителя будут расположены 32 ускоряющие секции (рисунок 1.9).

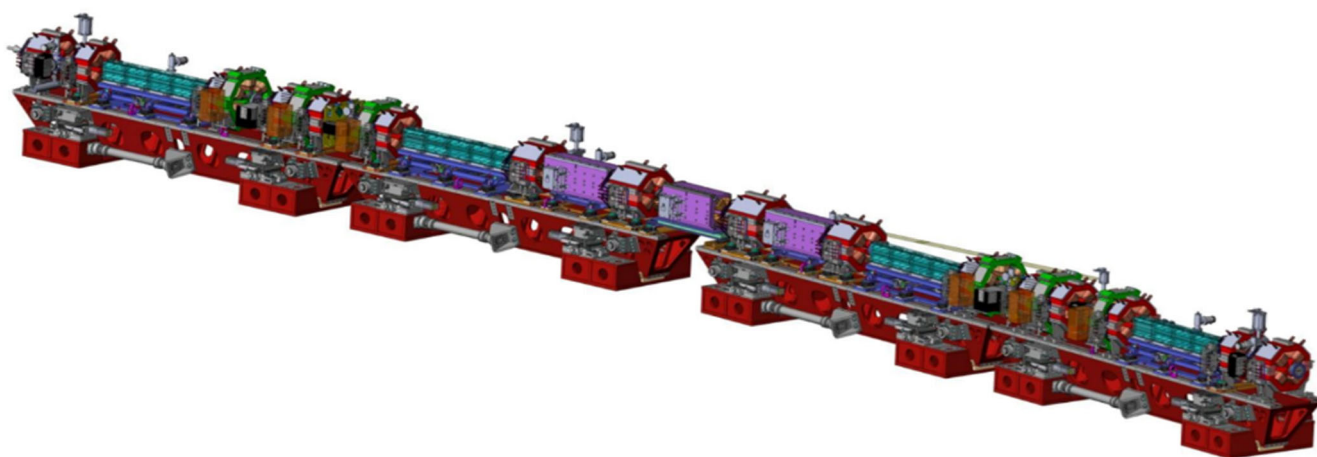


Рисунок 1.9 – Ускоряющая секция источника СИ ESRF – EBS

Для сборки ускоряющих секций было построено специальное здание, в котором параллельно на 12 гирдерах (четыре гирдера на трех линиях) устанавливаются электромагниты и вакуумные камеры.

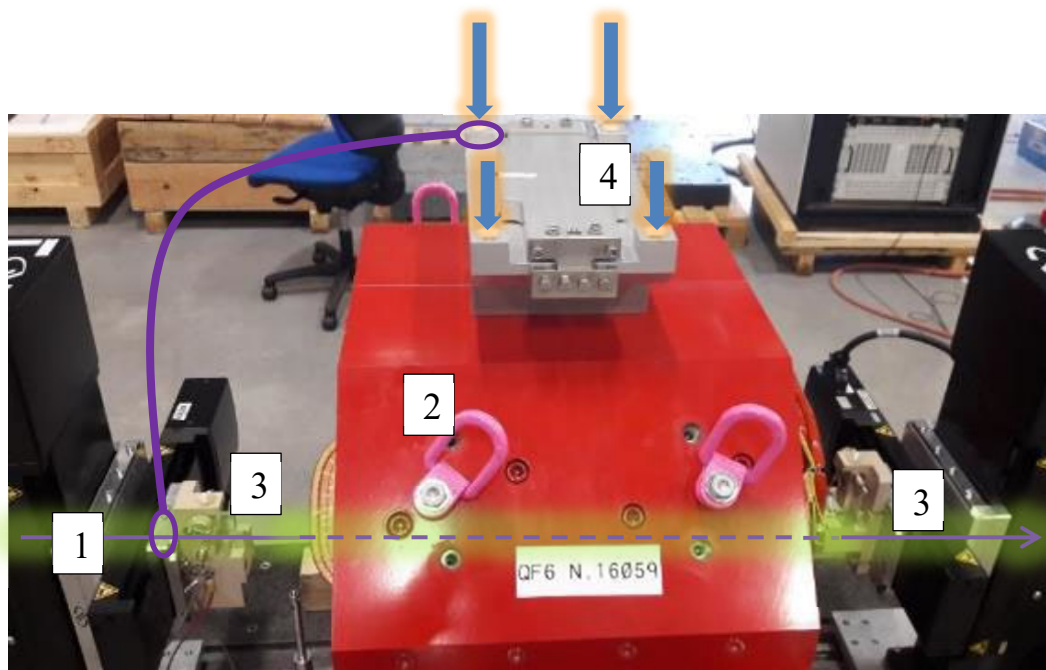
Перед установкой на гирдер каждый элемент проходит этап магнитных измерений. В ESRF измерение характеристик интегралов и гармоник полей различных типов электромагнитов производят с помощью специальной сканирующей струны (stretch-wire measurement system).

Система состоит из гранитной плиты, на которой установлены приспособления и сервоприводы, перемещающие струну. На эту же плиту устанавливаются электромагниты. Геодезическая группа производит определение базовых поверхностей, фиксирующих струну. По этим базовым плоскостям строится система координат, определяющая геометрическую ось струны. В системе координат определяют положение геодезических знаков (fiducial), которые представляют собой посадочные места для 1,5-дюймового отражателя и установлены на верхних поверхностях электромагнитов (рисунок 1.10). По координатам геодезических знаков устанавливают ось электромагнита на гирдере в проектное положение. Все геометрические измерения проводят лазерными трекерами Leica AT 400-ой серии.

Для определения параметров пучка частиц в теле вакуумной камеры каждой ускоряющей секции установлены системы диагностики (BPM). Для установки их в проектное положение необходимо получить координаты геодезических знаков, расположенных на внешней части камеры. Сканированием базовых поверхностей систем диагностики на внутренней части камеры фиксируют локальную систему координат и измеряют положение знаков (рисунок 1.11). Геометрическую связь осуществляют лазерным трекером Leica AT960 и устройствами сканирования T-probe и T-scan.

Гирдер ускоряющей секции, представляет собой твердое тело с четырьмя точками опоры (рисунок 1.12, б). Габариты гирдера: $5,1 \times 0,8$ м. Верхняя поверхность гирдера, на которую устанавливают магнитные элементы, определяет их вертикальное положение. Высотная отметка оси пучка относительно пола 1,199 м. Максимальная стрелка прогиба гирдера при его подъеме кран-балкой определяется

в пределах 0,05 мм. Это обеспечивает стабильность установленных в проектное положение магнитных элементов на нем при транспортировке.



1 – струна, определяющая ось магнитного элемента; 2 – электромагнит квадруполь; 3 – базовые поверхности, измеряемые для геометрического положения струны; 4 – геодезические знаки

Рисунок 1.10 – Определение координат реперных знаков элементов на стенде магнитных измерений ESRF

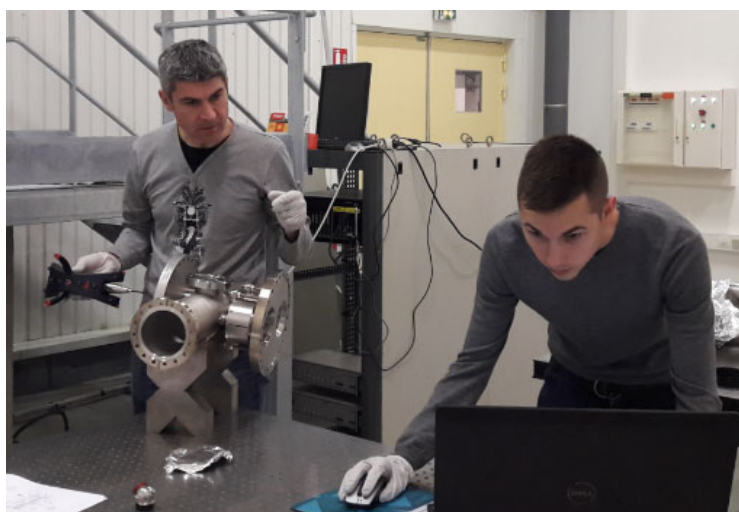


Рисунок 1.11 – Процесс измерения ВРМ с помощью Leica T-probe

Перед установкой магнитных элементов гирдер горизонтируют. На каждой опоре установлены электродвигатели, позволяющие перемещать гирдер в вертикальной плоскости с шагом в 5 мкм. Процедуру горизонтирования контролируют лазерным трекером. Далее геодезическая группа проводит измерения для фиксации локальной системы координат. Верхняя базовая плоскость (определяющая ось Z), правая направляющая (ось X) и торец, перпендикулярный оси пучка (ось Y), являются определяющими для создания локальной системы координат (рисунок 1.12, *а*). В этой ЛСК измеряют геодезические знаки, установленные на гирдере (по пять знаков на каждой стороне). По этим знакам позиционируют лазерный трекер для установки в проектное положение элементов на этапе сборки, а при монтаже в тоннеле ускорительного комплекса устанавливают гирдер в проектное положение.

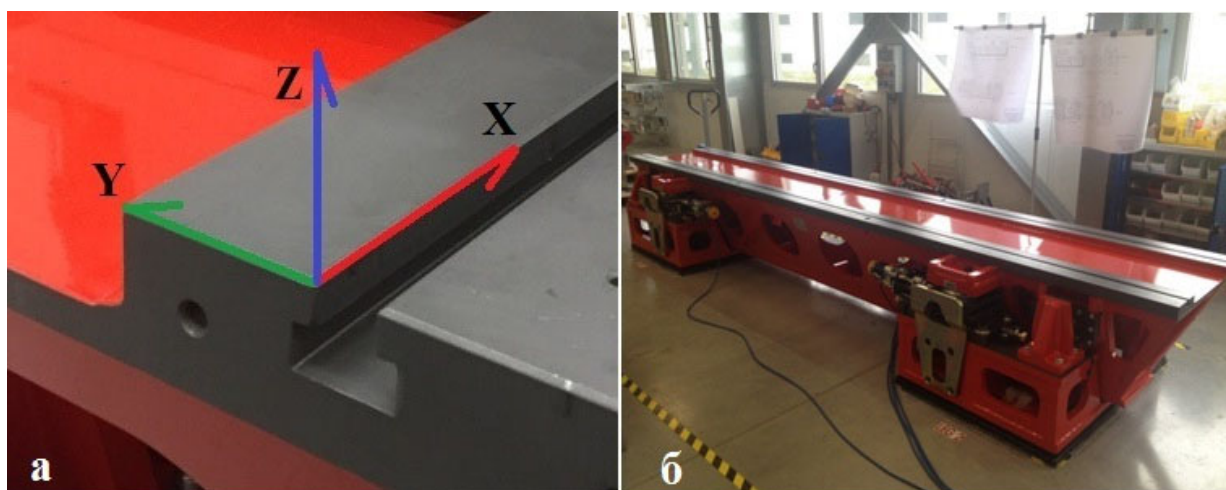
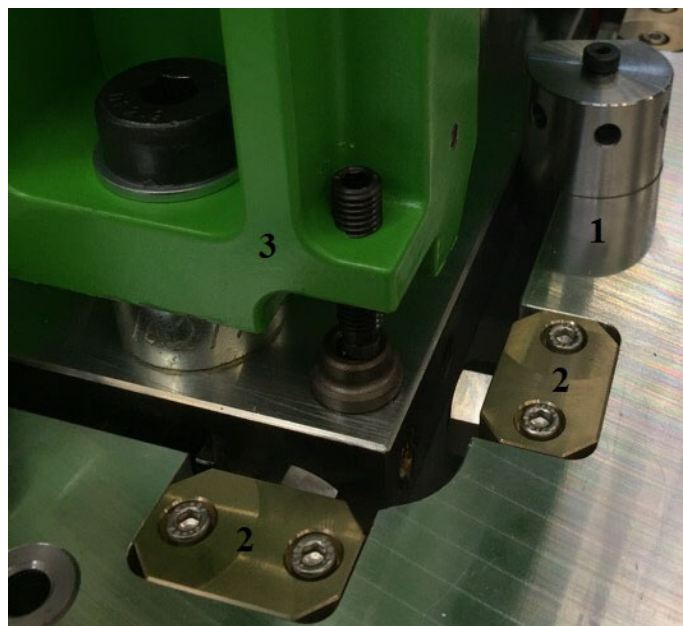


Рисунок 1.12 – Гирдер источника СИ ESRT-EBS: *а*) ЛСК гирдера;
б) общий вид гирдера без установленных элементов

Предварительная установка и юстировка магнитных элементов на гирдер осуществляются с помощью специальных шаблонов (рисунок 1.13). Они фиксируются на направляющие гирдера штифтами. На шаблонах имеются специальные цилиндрические упоры, позволяющие предварительно устанавливать магнитные элементы с точностью $\pm 0,5$ мм.

Установка в проектное положение, в соответствии с допусками, магнитных элементов осуществляется с применением лазерного трекера. Юстировочные болты на

шаблонах позволяют установить элемент с точностью 0,01 мм относительно проектных координат. При установке в проектное положение С-образного дипольного магнита используется угломер для контроля поперечного угла.



1 – упор предварительной выставки; 2 – юстировочные болты; 3 – электромагнит

Рисунок 1.13 – Шаблоны для юстировки магнитных элементов на гирдере

После юстировки всех магнитных элементов производят демонтаж их верхних частей для установки и юстировки вакуумной камеры на гирдере. После закрытия верхних частей магнитных элементов производят контроль положения лазерным трекером. Величина зазоров между полюсами элементов и камерой, по технической документации, от 2 до 0,9 мм. Если отклонения положения геодезических знаков не превышают величины 20 мкм, гирдер подготавливают к транспортировке на место хранения.

Данные результаты укладываются в допуски на установку в проектное положение, определенное проектом модернизации (таблица 1.1). Система координат – в соответствии с рисунком 1.1.

В таблице 1.2 указаны средние квадратические погрешности (СКП) положения элементов от этапа магнитных измерений до установки в кольцо ускорителя по результатам измерений 70 гирдеров.

Таблица 1.1

Тип магнитного элемента	Допуск, мкм		
	ΔS	ΔR	ΔZ
Диполь с постоянным полем	1000	100	100
Высокоградиентный квадруполь	500	60	60
Квадруполь	500	100	85
Секступоль	500	70	50
Октуполь	500	100	100

Таблица 1.2

Наименование измерений	СКП по координатам, мкм.		
	dx	dy	dz
Магнитные измерения	13	22	40
Создание ЛСК на гирдере	38	8	8
Разборка/сборка верхних частей магнитных элементов	8	5	7
Установка в проект на гирдере	126	29	31
Контроль положения магнитов на гирдере	6	7	8
Транспортировка	20	20	20
Установка в проект в тоннеле	25	15	15
Контроль положения в тоннеле	26	55	30
Итоговая СКП	139	72	65

Результаты положения элементов ускорителя, полученные после финальной юстировки, рассматривают как отклонения от проектного радиального и высотного направлений. Распределение погрешностей в кольцевых сетях ускорителей подчиняется гармоническому закону и может быть представлено в виде суммы гармоник Фурье. На рисунке 1.14 представлено положение элементов структуры источника СИ ESRF-EBS по результатам исполнительной съемки после финальной юстировки элементов до и после вычитания трех первых гармоник по радиальному направлению.

Пример модернизации источника СИ EBS-ESRF показывает объем контролируемого оборудования и количество геодезических работ, необходимых для достижения прецизионных параметров современных ускорительно-накопительных комплексов.

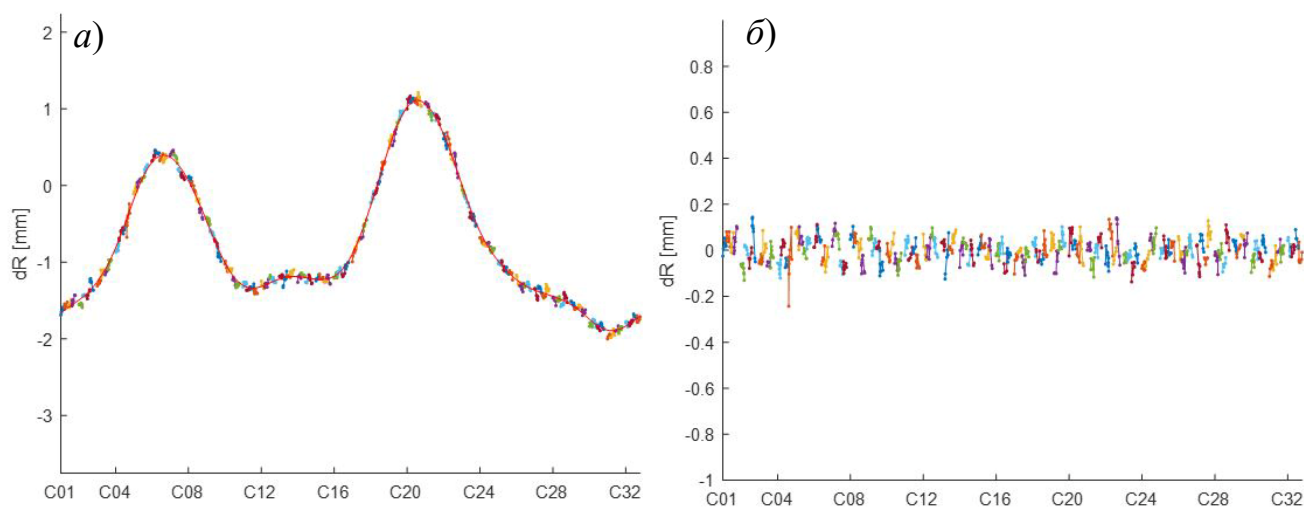


Рисунок 1.14 – Положение элементов структуры источника СИ ESRF-EBS:

- a)* – результаты положения для радиального направления по результатам исполнительной съемки;
- б)* после вычитания трех первых гармоник

1.5 Общие сведения о специальных геодезических сетях для установки элементов ускорительно-накопительного комплекса

Основной задачей специальной геодезической сети ускорительного комплекса (СГС УНК) является установка элементов магнитной структуры в проектное положение на этапе монтажа [16]. Точная взаимная установка критически важных элементов, таких как квадрупольные линзы, определяет успешный захват пучка частиц на начальном этапе эксплуатации комплекса. Установка элементов каналов транспортировки пучка из одного ускорителя в другой также невозможна без геодезической сети.

Специальная геодезическая сеть, являющаяся опорной для монтажа технологического и научного оборудования на промышленных площадках или объектах уникальных инженерных объектов, фиксирует систему координат и ориентирует проектные координаты относительно здания или цеха [23]. В производственных условиях часто возникают задачи проведения исполнительного контроля на соответствие проекту здания перед началом монтажа оборудования. Таким образом, проект специальной геодезической сети должен учитывать доступность и сохранность знаков на протяжении всего эксплуатационного периода объекта [10, 20, 21].

При строительстве циклических ускорителей больших периметров с установкой магнитной системы в подземном тоннеле используют многоступенчатую систему геодезического обоснования. В работе Лавриненко Е. Д. рассматривается разработка геодезического обеспечения при строительстве ускорительно-накопительного комплекса Института физики высоких энергий (УНК ИФВЭ) [12]. Этот ускоритель должен был стать самой крупной физической установкой для физики высоких энергий в стране, периметр построенного тоннеля – 21 км. На выбранной местности, перед строительством тоннеля ускорителя, создали наземную геодезическую сеть. Она является обоснованием первой ступени. Уникальность наземной сети УНК состоит в том, что она включает в себя 6 пунктов Лапласа, на которых были проведены измерения аномалий гравитационного поля [12]. Это было

сделано для оценки влияния неоднородности гравитационного поля на орбиту пучка. Наземная сеть измеряется методом полигонометрии. Второй ступенью обоснования является подземная опорная сеть, которая также создавалась методом полигонометрии [3]. Погрешность определения координат пункта в самом слабом месте сети составила не более 25 мм.

Наземная плановая сеть самого большого электрон-позитронного коллайдера LEP (сейчас LHC – большой адронный коллайдер, г. Женева, Швейцария) состояла из 8 пунктов и 9 пунктов сети сгущения (рисунок 1.15) [105]. Методом трилатерации были многократно измерены 10-километровые длины сторон треугольников с помощью дальномера «Терраметр». СКП положения пунктов по 63 приемам составила 1,2 мм. Ходами высокоточного нивелирования были связаны все пункты сети вдоль проектируемой оси тоннеля. Общая протяженность ходов составила около 90 км. Невязка прямого хода 2,1 мм при длине хода 37 км, с перепадом высот в 720 м [109]. Высокоточными работами на ускорителе LEP руководили такие специалисты, как Жервез Ж., Гартнер В., Хаблин М., Майод М. и др.

Передача координат с наземной сети на монтажный горизонт тоннеля является одной из ключевых инженерных задач строительства ускорительного комплекса. От точности передачи координат зависят сбойка тоннеля и отклонения оси тоннеля от проекта [13, 29, 32, 58].

При строительстве ускорительного центра CSNS – Китайский источник нейтронов в городе Дуангуань использовали новую схему передачи координат с наземной сети в тоннель ускорительного комплекса. Над вертикальным технологическим проемом в тоннель ускорителя устанавливалась несущая металлоконструкция с юстируемой подставкой для фиксации спутникового оборудования (рисунок 1.16, а).

Площадку предварительно совмещали с геодезическим знаком в тоннеле с помощью прибора вертикального проектирования Wild NL. После этого устанавливали на подставку специально доработанный антенный фиксатор. Его особенность в том, что в нижней части располагается посадочное место для отражателя лазерного трекера (рисунок 1.16, б, в).

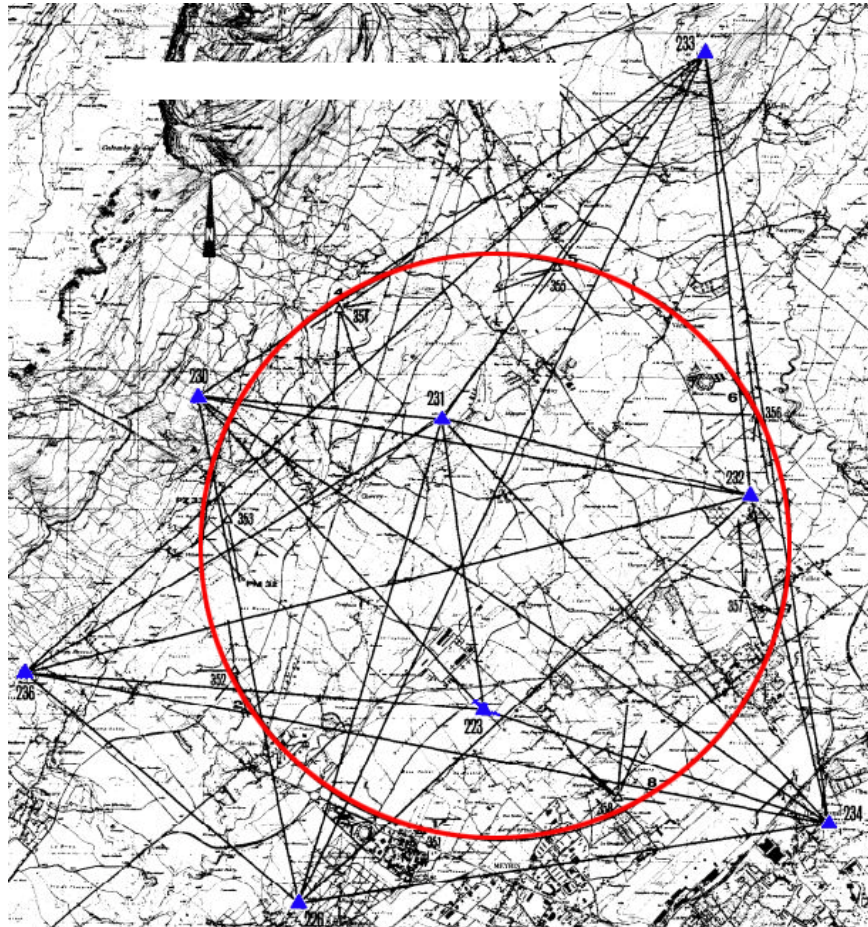


Рисунок 1.15 – Плановая геодезическая сеть ускорителя LEP

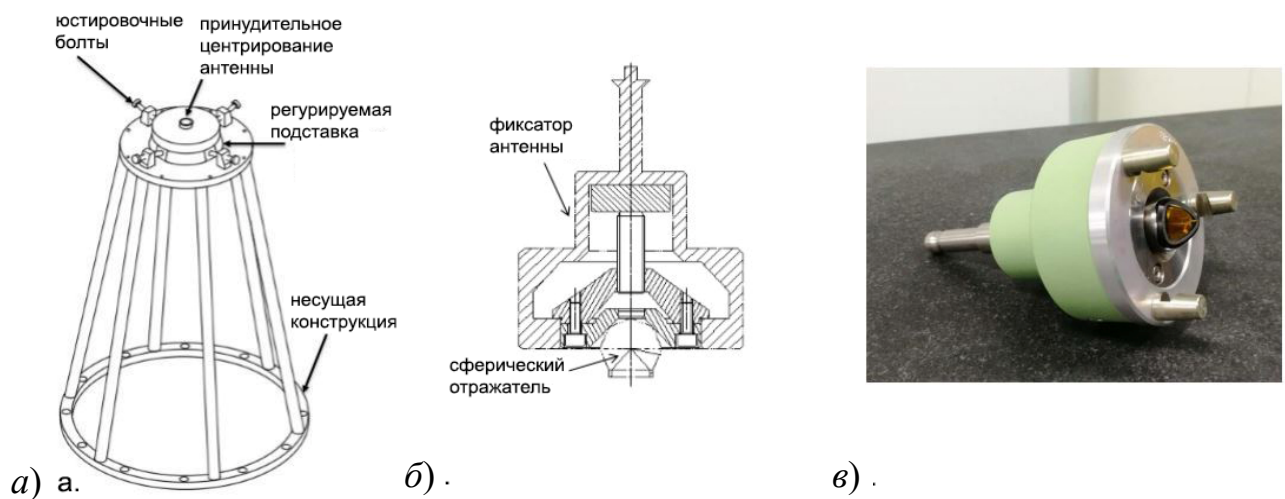


Рисунок 1.16 – Конструкция крепления спутникового оборудования для передачи координат с наземной сети в сеть ускорителя (а) и фиксатор антенны с посадочными метом под сферический отражатель лазерного трекера (б, в)

Соосность центров антенны отражателя составила 0,05 мм. Схема измерений при передаче координат представлена на рисунке 1.17. Максимальная несоосность знаков на длине 30 м, составила 0,45 мм.

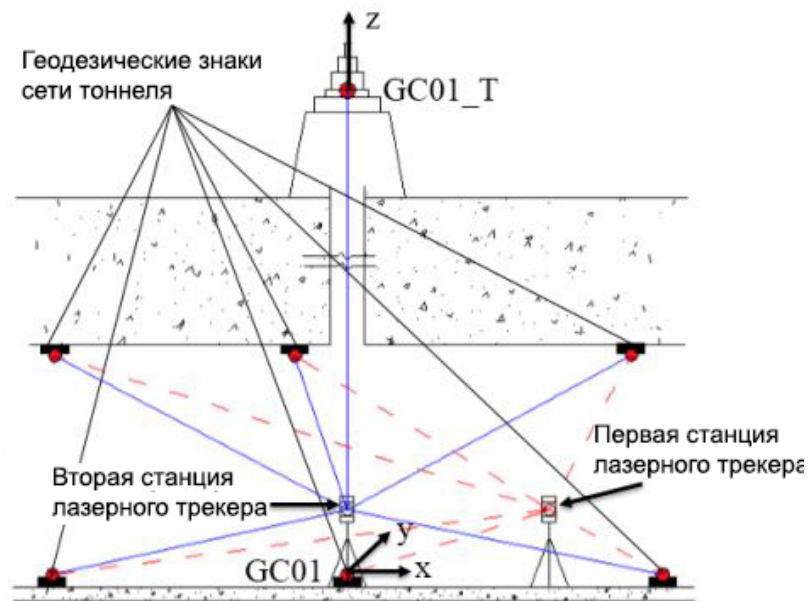


Рисунок 1.17 – Схема измерений при передаче координат лазерным трекером в сети ускорительного комплекса CSNS

При установке в проектное положение элементов магнитной структуры ускорительных комплексов с использованием отдельных планово-высотных методов измерений широкое распространение получили центральные, радиально-кольцевые и кольцевые системы опорных геодезических сетей [24, 81].

В центральной геодезической сети все радиальные измерения производились от одного или двух знаков. Такие системы получили распространение для сравнительно небольших ускорителей [5]. В радиально-кольцевой сети измерения геодезических знаков производились в два этапа. С центрального знака по радиальным тоннелям определяли положения знаков в сети основного кольца. Измерения на остальные знаки производили методами полигонометрии или диагональными построениями.

Кольцевая геодезическая сеть получила наибольшее распространение, так как не требовала создания дополнительных тоннелей для диагональной связи знаков. После многочисленных исследований при работах на кольцевых сетях было выяснено, что на точность определения положения геодезических знаков по радиусу более значительно влияют погрешности угловых измерений, чем линейных. Поэтому большое распространение получил метод микротрилатерации, в котором использовалась схема измерений высот и сторон вытянутых треугольников [57]. Схематическая интерпретация систем геодезических сетей циклических ускорителей представлена на рисунке 1.18.

Отличительной особенностью специальных геодезических сетей для установки технологического оборудования в проектное положение является критерий определения качества сети. Определение ошибки положения геодезического знака в слабом месте сети не является решающим параметром. Для каждого научного и технологического оборудования определены геометрические требования, соблюдение которых обеспечивает его работоспособность. Для циклических и линейных ускорителей критическим значением на установку в проектное положение является поперечное положение последовательно расположенных магнитных элементов.

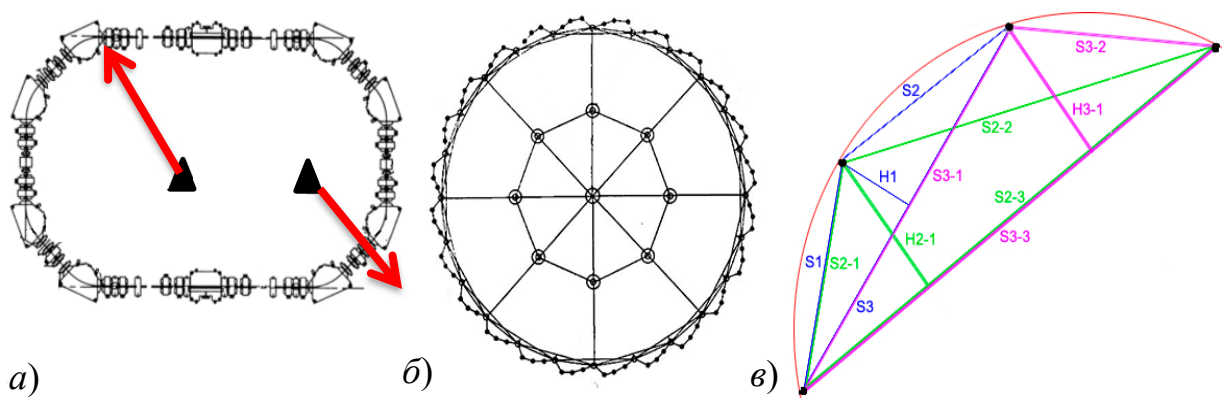


Рисунок 1.18 – Виды геодезических сетей циклических ускорителей:

- а) центральная сеть, на примере накопительно-охладительного комплекса ИЯФ СО РАН, с измерениями радиусов с двух центральных геодезических знаков;
- б) радиально-кольцевая сеть Ереванского синхротрона;
- в) кольцевая сеть с измерениями высот и длин сторон вытянутых треугольников

При монтаже рабочих клетей (рольганги) на листопркатном оборудовании критическим параметром при установке в проектное положение является высотная отметка валков и их плановый разворот относительно оси движения материала [94]. Требования на установку в проектное положение при монтаже и периодической юстировке оборудования в процессе эксплуатации отражается в проекте специальной геодезической сети [46, 47].

При монтаже контролируется положение геодезических знаков на элементах магнитной структуры, датчиках положения пучка и гирдерных модулях. Каждый из этих элементов проходит геометрический контроль при производстве. Паспортизация геодезических знаков в системе координат каждого элемента позволяет в дальнейшем произвести трансформацию из локальной системы элемента в общую систему координат установки. По геодезическим знакам производится контроль положения гирдерного модуля и элементов на нем или элемента на индивидуальной подставке (рисунок 1.19). В случае использования отдельных планово-высотных методов измерений (например, микротрилатерация кольцевых сетей + коротколучевое нивелирование), при установке в проектное положение или на сглаживающую кривую необходимо контролировать также угловые смещения элементов ускорителя.

При монтаже современных ускорительно-накопительных комплексов, где геодезический контроль проводят с применением лазерных трекеров, руководствуются допусками на поперечные и продольные смещения. Высокоточные измерения, обеспеченные благоприятными внешними условиями при их проведении (термостабилизация помещения, отсутствие боковой рефракции и т. п.), а также достаточное количество геознаков на элементах обеспечивают установку в проектное положение оборудования с требуемой точностью [4, 22, 87, 88].

В официальных источниках отсутствует классификация специальных геодезических сетей. Конфигурация сети, схема измерений, количество знаков в сети, а также инструменты для производства измерений выбираются с учетом специфики монтируемого объекта, обеспечения его работоспособности (геодезический

мониторинг) [16]. Кроме уменьшения производительности работ по времени, использование современных измерительных приборов позволило максимально упростить геодезические знаки как для специальной сети, так и для элементов магнитной системы. Например, используемый на геодезической сети ВЭПП-4М знак, который в свою очередь является уже упрощенной версией знака разработанного Лебедевым Н. Н., весит около 15 кг. Кроме того, он имеет сложную клиновую систему установки центральной втулки для горизонтирования. Используемый в настоящее время знак весит менее 300 г и состоит из дюралевой детали, постоянного магнита для удерживания отражателя лазерного трекера и анкерных болтов для фиксации на поверхности стен тоннеля.

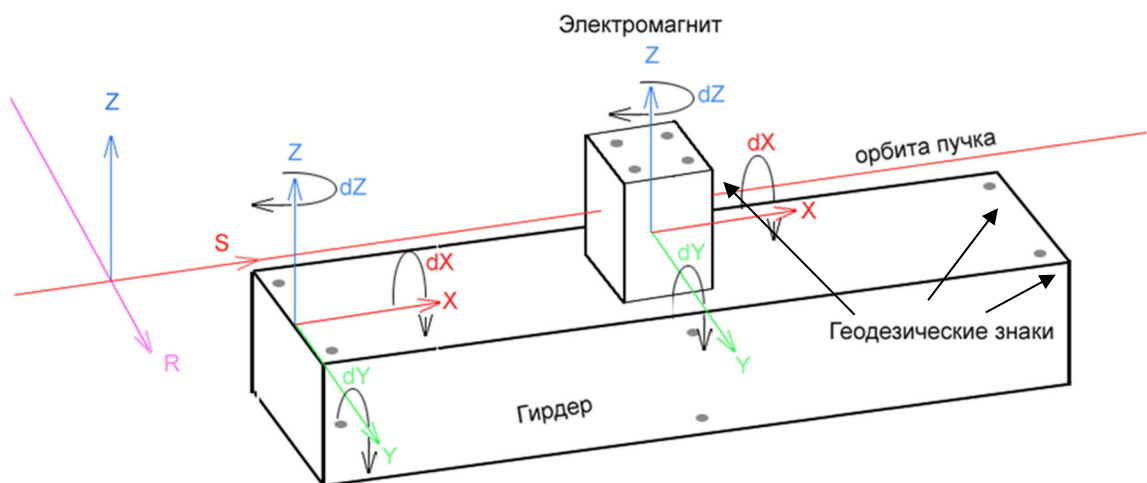


Рисунок 1.19 – Контролируемые шесть параметров (смещения вдоль X , Y , Z и вращения вокруг dX , dY , dZ осей системы координат) элемента оптической структуры ускорителя и гирдерного модуля в общей системе координат комплекса

Геодезические сети наиболее активно строящихся ускорителей – источников синхротронного излучения – подразделяются на два вида [11]. Первичные сети обеспечивают контроль геометрии зданий и сооружений комплекса на соответствие проекту, а также являются связующими между системами координат вторичных сетей.

Вторичные сети обеспечивают установку магнитной структуры ускорителя в проектное положение, ориентируют локальные системы координат в теле здания, в период эксплуатации комплекса являются основой для оценки осадок и деформации здания или тоннеля ускорителя.

На основании анализа сетей современных источников СИ, периметр которых варьируется от 0,5 до 1,5 км, можно сформулировать требования при проектировании СГС УНК. Погрешность определения знаков в первичной сети не должна превышать ± 3 мм, плотность пунктов выбирается таким образом, что бы максимально охватить территорию будущего комплекса [75, 79].

Погрешность определения знаков вторичной сети по результатам уравнивания должна составлять не хуже $\pm 0,07$ мм (для сетей со средним периметром тоннеля около 400 м), плотность пунктов в тоннеле ускорителя 0,4–0,8 на погонный метр. Геодезические знаки должны быть надежно зафиксированы и доступны на весь период эксплуатации комплекса [110].

Разработанная схема, отображающая двухступенчатый состав специальной геодезической сети и ее развитие на этапах монтажа и эксплуатации УНК, приведена на рисунке 1.20.

Структура геодезической сети источника СИ ESRF (Европейский Синхротронный Центр) соответствует вышеописанной схеме. Первичная сеть закреплена по периметру территории центра и вдоль дорог бетонными столбами, на оголовке которых вмонтированы столики принудительного центрирования для геодезических приборов. Плановое положение знаков определяется с помощью спутникового оборудования, а высотное – цифровыми нивелирами. Первичная сеть источника СИ ESRF представлена на рисунке 1.21.

Вторичная геодезическая сеть основного кольца для установки в проектное положение элементов структуры закреплена 463 знаками для сферического отражателя лазерного трекера в тоннеле ускорителя. Сеть здания обеспечивает монтаж выводов синхротронного излучения до пользовательских станций (beam line) (рисунок 1.22).

Стадия монтажа

Первичная сеть – связь всех систем координат УНК

Вторичная сеть первого этапа – ориентирует систему координат УНК в тоннеле; между знаками большие расстояния, чем между знаками сети второго этапа.

Вторичная сеть второго этапа – достаточная плотность знаков для обеспечения монтажа оборудования УНК в соответствии с нормативными требованиями, включает в себя знаки сети первого этапа для определения деформаций сооружения.



Стадия эксплуатации

Вторичная сеть – геодезический мониторинг оборудования УНК и его периодическая юстировка.

Рисунок 1.20 – Схема развития геодезических сетей в жизненном цикле ускорительно-накопительного комплекса

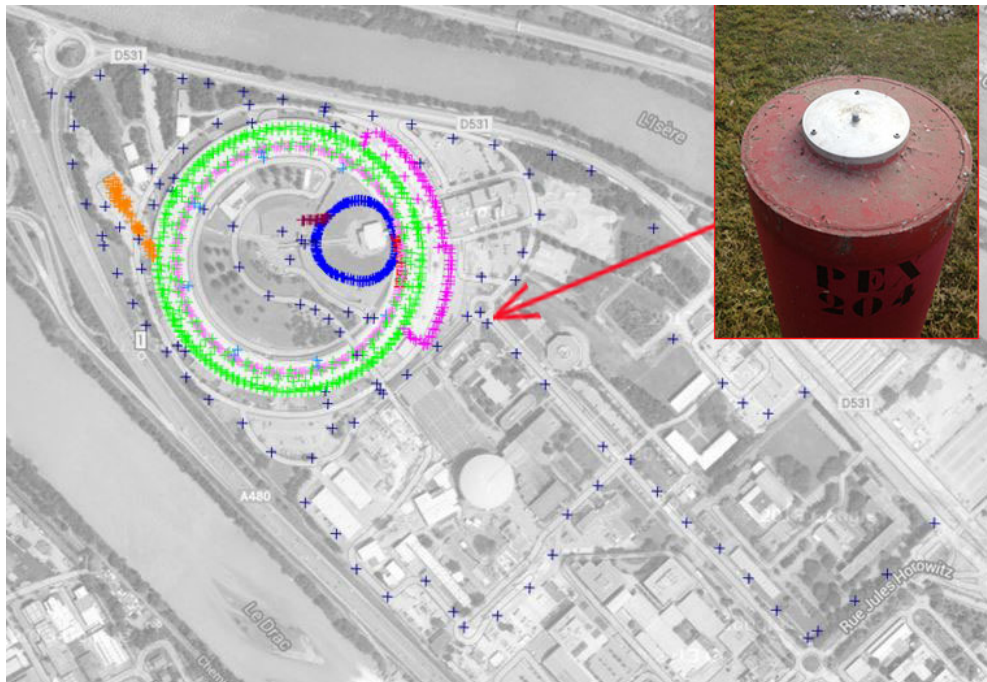
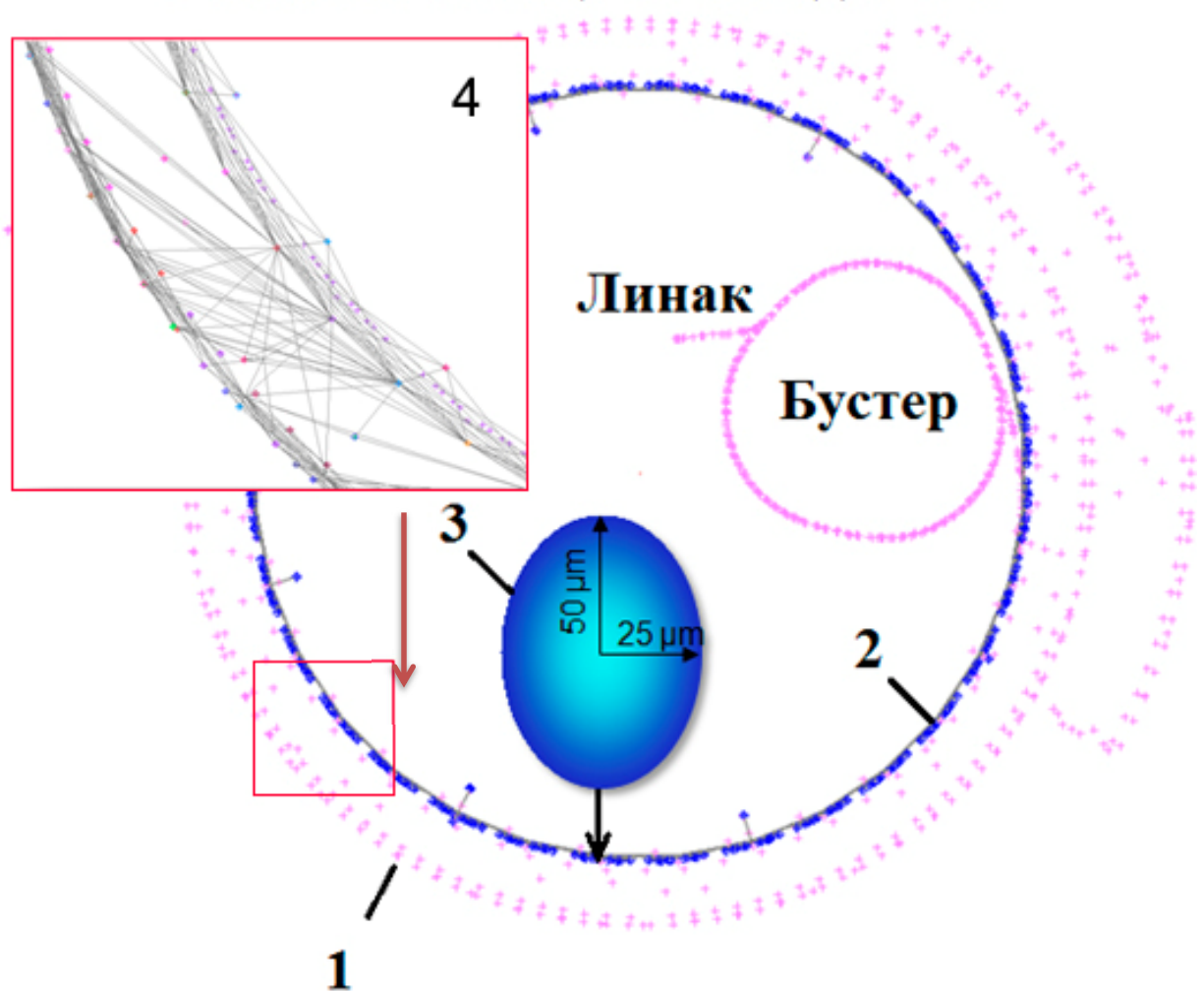


Рисунок 1.21 – Первичная сеть Европейского синхротронного центра и геодезический знак

Схема сети измерений лазерным трекером усложняется отсутствием широких проемов для передачи координат от сети тоннеля к сети здания EX2. Каждый измеренный в зале знак со станции лазерного трекера внутри тоннеля измеряется также многократно со станций, расположенных над защищенным тоннелем.

Основное кольцо и выводы СИ



1 – сеть здания основного кольца EX2; 2 – сеть в тоннеле ускорителя (пункты выделены синим цветом); 3 – эллипс погрешностей определения знаков сети с величиной полуосей, в мкм; 4 – связь сети тоннеля источника СИ и сети здания EX2

Рисунок 1.22 – Геодезическая сеть источника СИ ESRF

С 1993 г. для контроля высотных смещений в режиме реального времени используется система гидростатического нивелирования. Уровненная поверхность

этой системы является базовой. На каждом гирдере установлено по четыре датчика, фиксирующих изменения уровневой поверхности с СКП 1,7 мкм. Показания всех датчиков анализируются специальным программным обеспечением на ЭВМ в пультовой ускорительного комплекса. Через систему обратной связи производят вертикальную юстировку гирдеров, если датчики зафиксировали смещение. Несмотря на многочисленные сложности в эксплуатации этой системы, геодезическая группа ESRF добилась ее стабильной работы, что позволило сократить сроки работ во время остановки комплекса.

Перед началом монтажа элементов на гирдере или индивидуальных подставках необходимо определить места их крепления в помещении или тоннеле ускорительного комплекса. Для этого, после создания СГС УНК, выносят линию, являющуюся проекцией оси пучка на полу тоннеля.

Эта линия является основой для установки гирдерных модулей, а также используется другими инженерными службами (ориентировка при прокладке кабельных трасс, труб подачи дистиллята и т. д.). Точность нанесения этой линии составляет около ± 5 мм. В зависимости от выбранной конструкции гирдерного модуля производится его монтаж. Например, для бустера источника СИ NSLS-II, от линии с помощью специальных шаблонов размечались места установки и фиксации к полу опорных конструкций гирдера. После на них устанавливался сам гирдер с элементами структуры (рисунок 1.23).

В соответствии с каталогом координат гирдер устанавливаются в проектное положение. Предварительная установка гирдерных модулей, как правило, ограничивается погрешностью установки в проект $\pm 0,1$ мм. После монтажа всего оборудования в тоннеле производится финальная юстировка, где контролируют взаимное положение модулей.



Рисунок 1.23 – Установленные опорные конструкции гирдера относительно вынесенной линии оси

В период эксплуатации ускорительного комплекса геометрическое положение структуры изменяется под действиями сезонных деформаций и других факторов [35, 41]. Из-за крупных размеров сооружения и большого количества оборудования оказалось нецелесообразно производить периодическую юстировку к проектным значениям. При геодезическом мониторинге определяют положение всех геодезических знаков на элементах в системе координат комплекса и при обработке результатов строят сглаживающую кривую. Сглаживающая кривая подчинена критерию аппроксимации, при которой сумма отклонений положения элементов структуры является минимальной и вызывает наименьшие искажения орбиты. Подробно построение сглаживающих кривых описано в работе Левашова Ю. И. [38]. Такой подход используется на Большом Адронном Коллайдере. Из-за большого количества оборудования, которое необходимо контролировать, геодезическая группа ЦЕРН (Центр Европейских Ядерных Исследований) производит периодическую взаимную подвижку элементов структуры к оптимальной сглаживающей кривой [118].

Строительство крупных научных (mega-science) проектов иногда осуществляется на площадках, уже отработавших свой ресурс комплексов [2, 45]. При этом возникает проблема отсутствия проектных чертежей зданий и расположения в них функционирующих комплексов, что замедляет процесс проектирования новой установки.

Канал транспортировки Бустер-Нуклотрон, являющийся частью ускорительного комплекса NICA (Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна), служит для перевода пучка с минимальными потерями из Бустера в кольцо Нуклотрона. Канал имеет сложную пространственную геометрию, в значительной степени определяемую взаимным положением Бустера и Нуклотрона. Синхротроны имеют различные радиусы, и их медианные плоскости разнесены по вертикали на 3,76 м. Суммарная длина канала составляет 23,1 м [84]. Автором диссертации в составе геодезической группы ИЯФ СО РАН была выполнена работа по созданию опорной геодезической сети и трехмерной модели участка перепускного канала [67].

В период с 16 по 21 октября 2016 г. была произведена геодезическая съемка в зале синхрофазотрона и тоннеле Нуклотрона. Съемка производилась лазерным трекером Leica AT 401. Для связи всего участка канала Бустер-Нуклотрон была создана опорная геодезическая сеть, которая состоит из 21 знака. Произведенная съемка была связана с системой координат Бустера через четыре знака на третьем прямолинейном промежутке.

Обработка данных измерений и построение 3D-модели производились в программном обеспечении Spatial Analyzer. Вся модель построена из множества плоскостей, построенных по методу наименьших квадратов (рисунок 1.24).

Каждая плоскость преобразована в поверхность для дальнейшего экспорта в CAD-программы. В таблице 1.3 отображены погрешности измерений при создании модели канала перепуска.

Созданная геодезическая сеть позволила спроектировать перепускной канал с учетом реальных габаритов элементов здания Синхрофазотрона, уточнить разницу медианных плоскостей Бустера и Нуклотрона, задать места вскрытия

бетонных перекрытий для установки опор электромагнитов канала. От этой сети также будет производиться установка в проектное положение всех элементов канала.

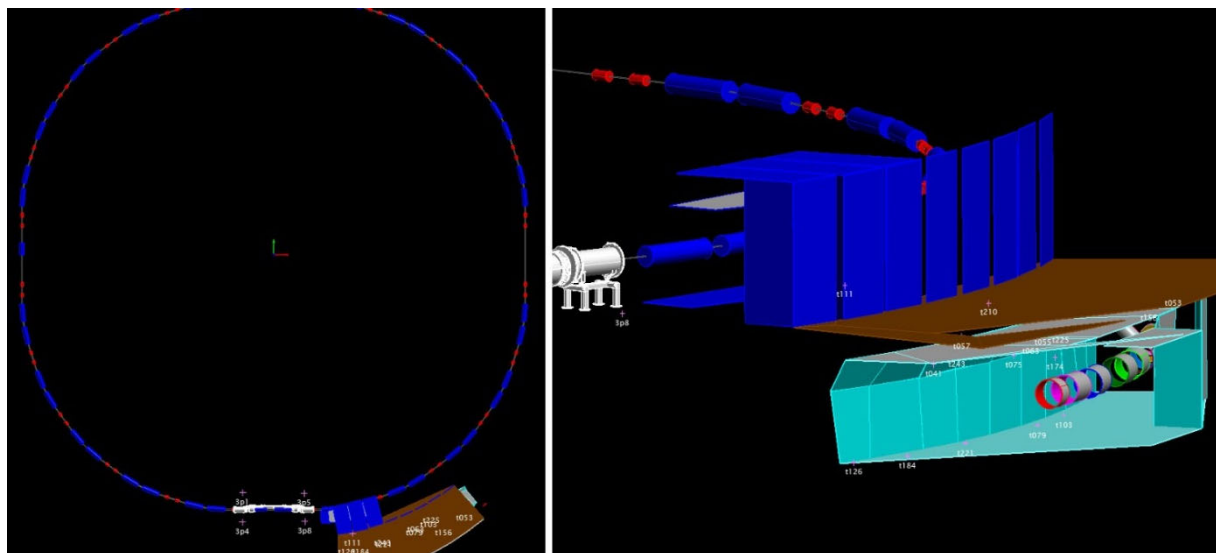


Рисунок 1.24 – Трехмерная модель области проектируемого канала транспортировки Бустер-Нуклотрон

Таблица 1.3

Наименование измерений	Величина СКП, мм
Связь съемки и СК бустера	$\pm 0,15$
СКП опорной сети канала Бустер-Нуклотрон	$\pm 0,02$
Бетонные конструкции	± 50
Ярмо Синхрофазатрона	± 3
Оси криостатов Нуклотрона	$\pm 0,1$

1.6 Постановка задачи исследования и выводы по первому разделу

Специальные геодезические сети – основа при строительстве и эксплуатации ускорительного комплекса, фиксирующая систему координат в зале или тоннеле комплекса. Проектирование любого ускорителя включает этап разработки сети,

удовлетворяющей установке магнитной структуры в проектное положение. Из-за возрастающих объемов геодезических работ в процессе создания современного ускорительного комплекса проект сети должен максимально учитывать необходимую информацию: количество требуемых к закреплению геодезических знаков; количество станций лазерного трекера; необходимые человеческие и временные ресурсы для производства измерений сети; предварительную оценку точности определения координат знаков сети и спектральный анализ полученных погрешностей измерений.

На основании проведенного анализа геодезического обеспечения создаваемых в последнее время ускорительных комплексов, а также необходимость таких работ в реализуемых Российской Федерацией проектах класса «мегасайнс» были сформулированы следующие задачи:

- выполнить исследования влияния расстояний на параметры эллипсоидов погрешностей положения отражателя при производстве геодезических измерений лазерными трекерами API Radian и Leica 400 серии;
- разработать алгоритм вычисления оптимальных секторов работы лазерных трекеров с учетом заданного допуска на установку технологического оборудования и радиуса ускорительно-накопительного комплекса;
- разработать методику геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения;
- провести экспериментальное исследование разработанной методики геодезического обеспечения для установки элементов магнитной структуры источника синхротронного излучения 4-го поколения СКИФ.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СЕКТОРОВ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1 Исследования внутренней сходимости лазерных трекеров API RADIAN и Leica AT 400-й серии

Последние десять лет в России стали активно использоваться высокоточные мобильные координатно-измерительные приборы – лазерные трекеры. Были проведены многочисленные исследования на соответствие заявленным производителем точностным характеристикам. В работе Буренкова Д. Б. и др. приведены результаты линейных измерений лазерного трекера API T3 с интерферометром Hewlett-Packard 5529A. Максимальное отклонение от эталона (интерферометр) на расстоянии 24 м, составило 16 мкм в интерференционном режиме измерения расстояний (IFM) лазерного трекера и 22 мкм – в режиме абсолютного дальномера (Absolute Distance Meter) [27]. В работе Травкина С. В. освещены исследования определения величины погрешности превышений лазерным трекером FARO на калибровочном стенде. В качестве эталонов выступили растровый измерительный преобразователь и интерферометр. Исследования показали, что погрешность измерений превышений не превышает 30 мкм [85]. Результаты исследований в ИЯФ СО РАН для трекеров серии API T3 выявили погрешность работы компенсатора при измерении превышений. Это удалось исправить закреплением 6-минутного уровня для предварительной установки прибора в рабочее положение на измерительную головку трекера [26]. Для новой серии лазерных трекеров RADIAN такой ошибки в работе компенсатора выявлено не было.

Вышеперечисленные работы указывают на необходимость проведения исследований перед использованием измерительного средства в высокоточных работах. Для проектирования геодезических сетей важными параметрами являются пространственные погрешности определения знаков. Установив, что погрешности

определения углов и расстояний от эталонных приборов лежат в допустимых пределах в соответствии с техническими характеристиками производителя, выполним исследования повторяемости измерений лазерных трекеров. По данным многократных измерений определим эллипсоиды погрешностей лазерных трекеров.

Повторяемость – это степень близости друг к другу результатов независимых измерений, полученных одним и тем же методом, на одном и том же объекте испытаний и одним и тем же оборудованием [15].

Среднеквадратические погрешности определения расстояния, горизонтального и вертикального углов лазерных трекеров серии API RADIAN вычисляются по формулам [99, 106–108]

$$m_L = 7 \cdot 10^{-4} \cdot L_{(M)}, \quad (2.1)$$

$$m_\beta = m_\gamma = 1 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L_{(M)}, \quad (2.2)$$

где m_L – погрешность измерения расстояний в режиме абсолютного дальномера; m_β , m_γ – погрешность горизонтального и вертикального углов.

Среднеквадратические погрешности измерения расстояний указаны в паспорте трекеров Leica AT 400-й серии ± 10 мкм. СКП угловых измерений вычисляются по формуле [104]

$$m_\beta = m_\gamma = 15 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} \cdot L_{(M)}. \quad (2.3)$$

Для удобства оценки повторяемости каждого измерения создается своя система координат. Начало системы координат – пересечение вертикальной и горизонтальной осей инструмента. Ось X сориентирована на положение отражателя со среднеарифметическими значениями координат, полученных на каждой остановке каретки. Ось Z направлена вверх и перпендикулярна оси X . Ось Y дополняет систему координат до правой.

Среднеквадратическая погрешность определения отражателя по трем координатам вычисляется как

$$m_{\text{отр}} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_Z^2} = \sqrt{m_L^2 + m_\beta^2 + m_v^2}, \quad (2.4)$$

где $m_X = m_L$; $m_Y = m_\beta$; $m_Z = m_v$ – параметры эллипсоида погрешности положения отражателя.

Произведены многократные измерения для определения повторяемости координат центра сферического отражателя лазерными трекерами API и Leica. Паспортная точность центрирования отражателя внутри сферы $\pm 0,003$ мм.

СКП вычислялась по результатам внутренней сходимости измерений с использованием известной формулы Бесселя

$$m_{L,\beta,v} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

где Δ_i – уклонение i -го результата измерения от среднего значения; n – число выполненных измерений в серии.

Исследования точности измерений лазерным трекером API RADIAN производились в помещении компараторной ИЯФ СО РАН при постоянной температуре $+24,9$ °С и отсутствии конвекции воздушных потоков. Это в значительной степени ослабило влияние рефракции, что определяет получение результатов оценки точности, обусловленных только инструментальными погрешностями используемого измерительного оборудования. Сферический отражатель устанавливался на каретку и перемещался электродвигателем по направляющей компаратора.

Схема расположения трекера относительно направляющей представлена на рисунке 2.1.

Трекер находился ниже уровня направляющей на 167 мм. Положение отражателя в каждом месте остановки на направляющей измерялось трекером в автоматическом режиме 50 раз. Отражатель плавно поворачивался при перемещении каретки по направляющей для исключения ошибки за разность центра сферы и отражателя.

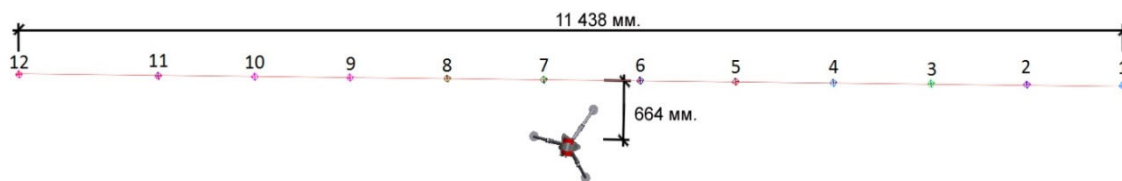


Рисунок 2.1 – Схема положения сферического отражателя, измеряемого лазерным трекером API RADIAN, на направляющей компаратора ИЯФ СО РАН

На рисунке 2.2 приведены значения среднеквадратических погрешностей результатов измерений, полученных в условиях повторяемости [15]. Разброс результатов измерений укладывается в диапазон линейно-угловых погрешностей, указанный в паспорте прибора.

Измерения трекерами Leica AT 401, 403 производились в здании сборки гирдерных модулей ESRF (Гренобль, Франция). Помещение термостатировано, температура 20,5 °С. Местами установки сферического отражателя являлись стабильные геодезические знаки гирдерных модулей и электромагнитных элементов.

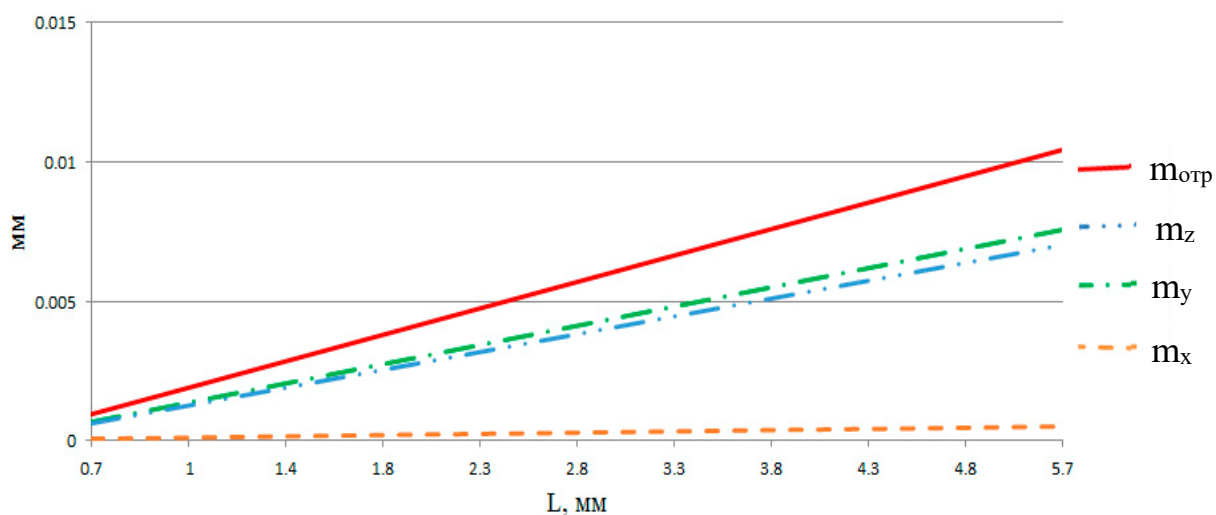


Рисунок 2.2 – График зависимости погрешностей лазерного трекера API RADIAN от расстояния

Максимальное превышение между точками 4-5 1 235 мм. Схема расположения мест установки сферического отражателя относительно лазерного трекера приведена на рисунке 2.3.

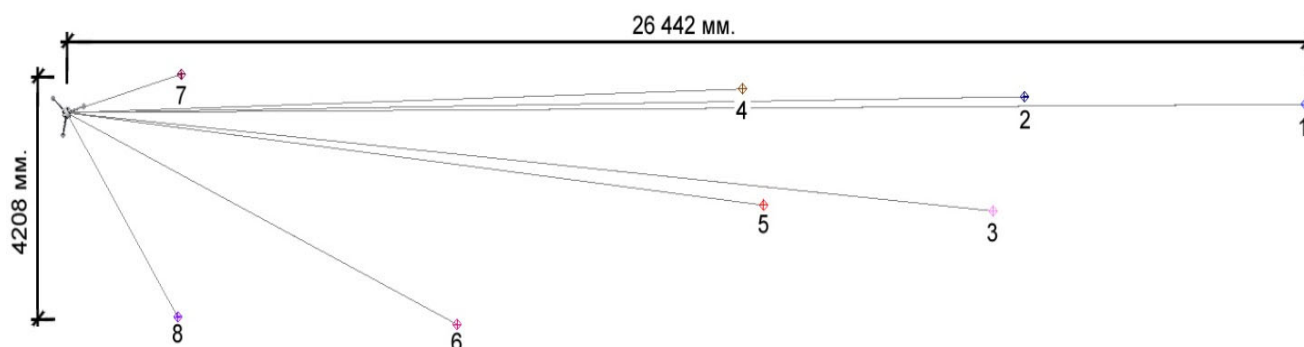


Рисунок 2.3 – Схема расположения сферического отражателя при проведении измерений лазерными трекерами Leica

На рисунках 2.4, 2.5 приведены значения среднеквадратических погрешностей результатов измерений лазерными трекерами AT 401 и AT 403.

Следует отметить, что величины СКП трекера Radian меньше величин СКП трекеров Leica из-за гораздо меньших измеренных расстояний первым. Все измерительные инструменты соответствуют заявленным характеристикам производителя.

На основании проведенного исследования определены СКП измерений вертикального и горизонтального углов и расстояний. Полученные в результате выполненных исследований значения полуосей эллипсоидов погрешностей являются математическим основанием настройки модуля Measurement Simulation для моделирования геодезических измерений в программном продукте Spatial Analyzer, которые будут рассмотрены в 3.2.

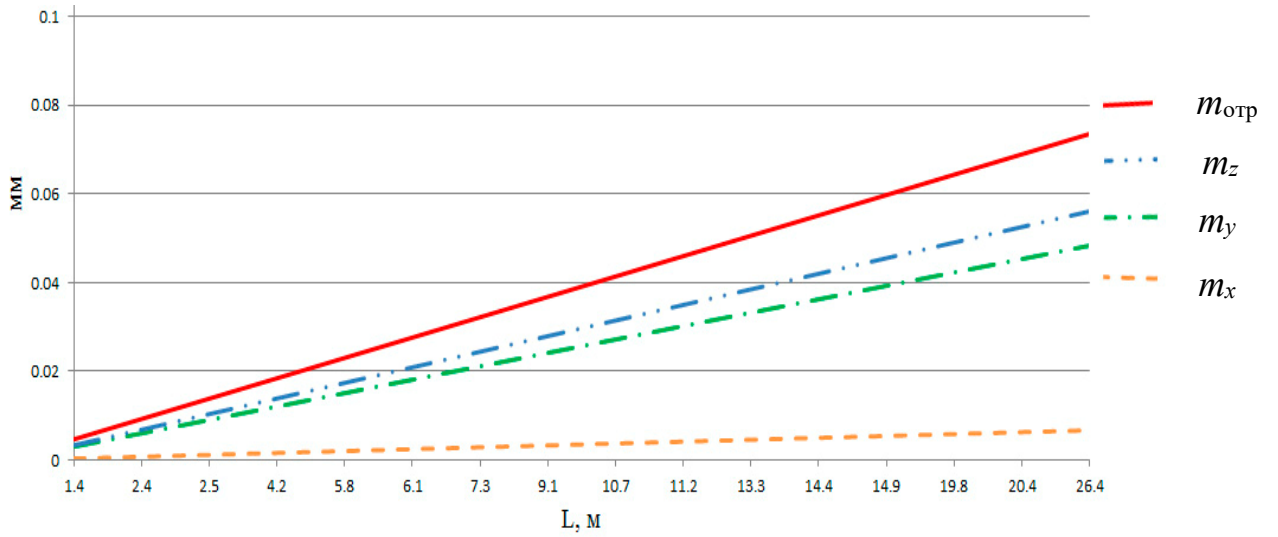


Рисунок 2.4 – График зависимости погрешностей лазерного трекера Leica AT401 от расстояния

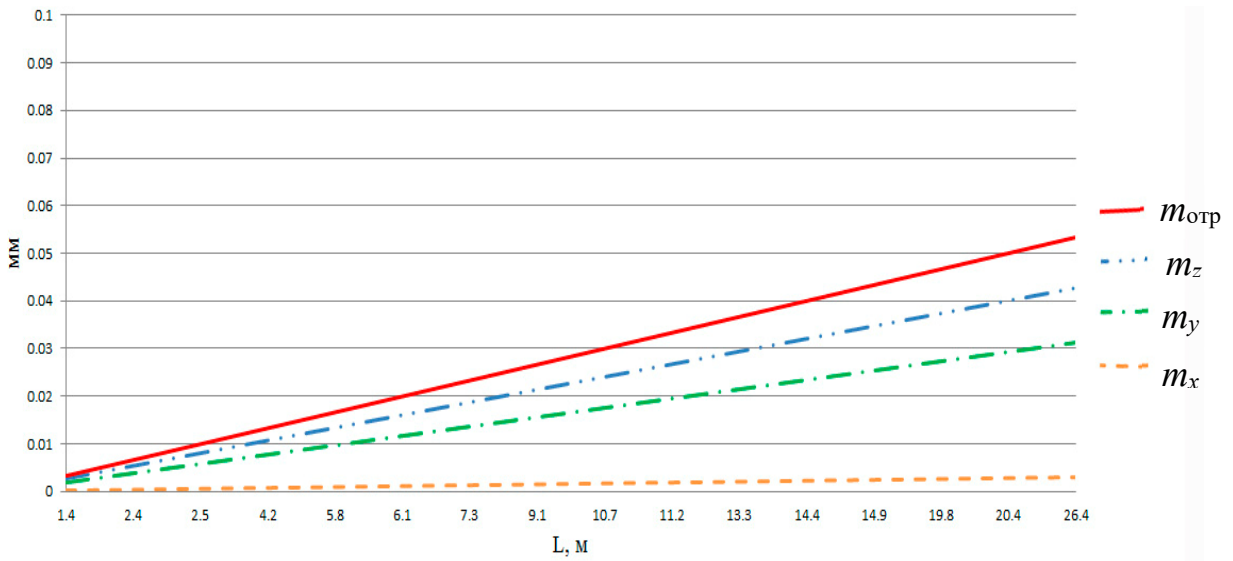


Рисунок 2.5 – График зависимости погрешностей лазерного трекера Leica AT403 от расстояния

2.2 Алгоритм вычисления секторов измерений со станции лазерного трекера с учетом допусков на установку технологического оборудования на кольцевую ось

Основным требованием при установке в проектное положение элементов ускорителей заряженных частиц и другого уникального технологического оборудования является соблюдение допусков радиального и высотного положения [18, 55]. Установка станции лазерного трекера часто выбирается непосредственно на объекте с учетом создавшейся ситуации (ограничение видимости, неблагоприятные условия для измерений и т. д.) Для установки технологического оборудования на проектную кольцевую орбиту с заданной точностью требуется определить оптимальные зоны местоположения станций лазерного трекера.

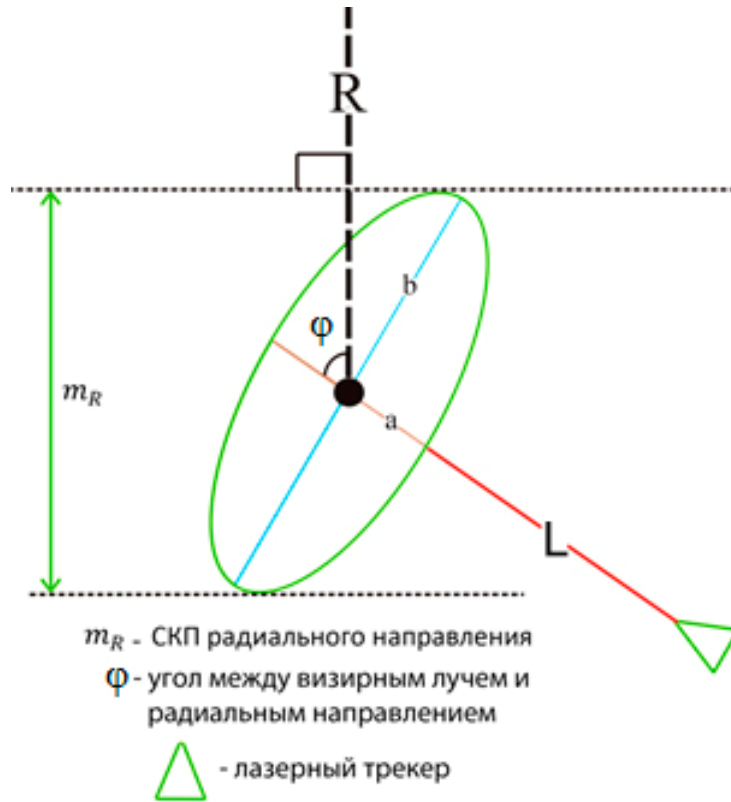
Так как визирный луч лазерного трекера при установке технологического оборудования или съемке сети ускорительного комплекса находится под разными углами к контролируемым направлениям орбиты пучка, необходимо определить проекции на поперечные выделенные направления $m_{R,Z}$ (рисунок 2.6).

Поле допуска современных ускорителей в поперечных направлениях к орбите

$$m_{R,Z \text{ доп.}} = 0,05 \text{ мм.} \quad (2.6)$$

Для расчетов возьмем значения погрешностей измерений лазерного трекера API Radian (формулы (2.1), (2.2)). Это значения максимально допустимой ошибки (Maximum Permissible Error) в соответствии со стандартом ASME B89.4.19-2006 [107].

Рассмотрим случай постановки станции за проектным радиусом в здании комплекса и определим величину m_R (рисунок 2.7)



a, b – полуоси эллипса погрешностей лазерного трекера; L – расстояние от станции прибора до отражателя; R – радиальное направление

Рисунок 2.6 – Проекция СКП определения положения оборудования на контролируемое направление

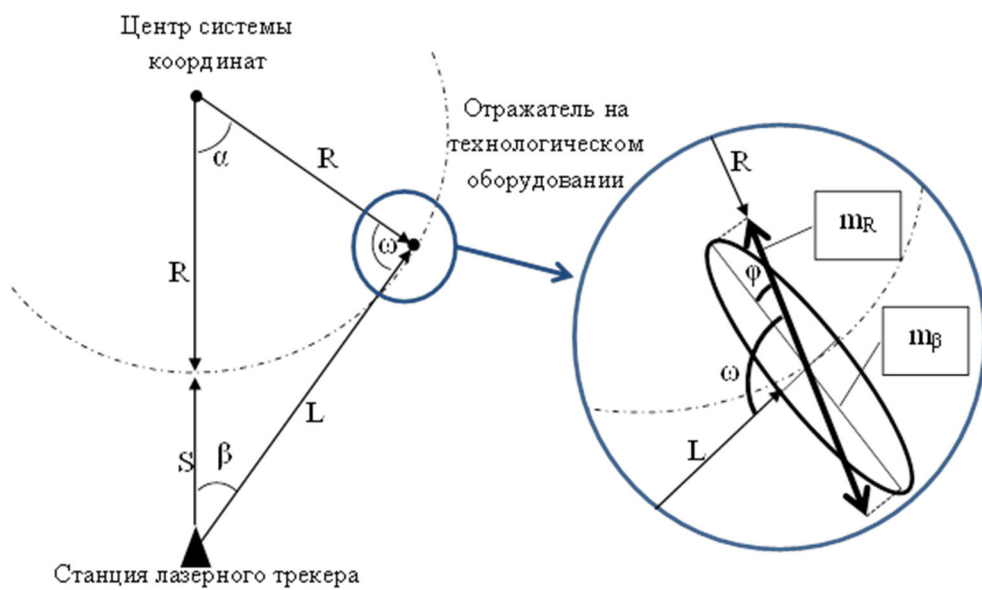


Рисунок 2.7 – Станция за проектным радиусом

Определим расстояние L от станции лазерного трекера до отражателя, который установлен на технологическом оборудовании, и горизонтальный угол β между направлением на центр системы координат и заданной линией [51].

По теореме косинусов определим L и β :

$$L = \sqrt{(R^2 + (R+S)^2 - 2 \cdot R \cdot (R+S) \cdot \cos\alpha)}, \quad (2.7)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{(R+S)^2 + L^2 - R^2}{2 \cdot (R+S) \cdot L}\right), \quad (2.8)$$

где R – заданный радиус, на который необходимо установить технологическое оборудование; S – расстояние от лазерного трекера до заданного радиуса.

Для определения величины m_R необходимо знать угол между полуосью эллипса погрешностей и заданным направлением φ . Вычисляем его через угол ω

$$\omega = 180 - \beta - \alpha; \quad (2.9)$$

$$\varphi = \omega - 90. \quad (2.10)$$

Величина m_R :

$$m_R = \cos\varphi \cdot m_\beta. \quad (2.11)$$

По данному алгоритму произведены расчеты для $R = 10$ м, $\alpha = n + 5^\circ$ ($n = 0-85^\circ$), $S = 0,5; 2; 5; 10$ м. Критерий для выбора диапазона измерений параметров (L и β) на станции лазерного трекера установим следующим образом:

$$m_R \leq m_{R \text{ доп.}} \quad (2.12)$$

Результаты, удовлетворяющие этому условию, приведены в таблице 2.1.

Графическая интерпретация результатов расчетов при работе лазерным трекером за кольцевой осью технологического оборудования приведена на рисунке 2.8.

Таблица 2.1

S , м	L , м	β , °	m_R , мм
0,5	6,8	62	0,049
2	6,8	56	0,049
5	7,8	38	0,047
10	11,6	21	0,049

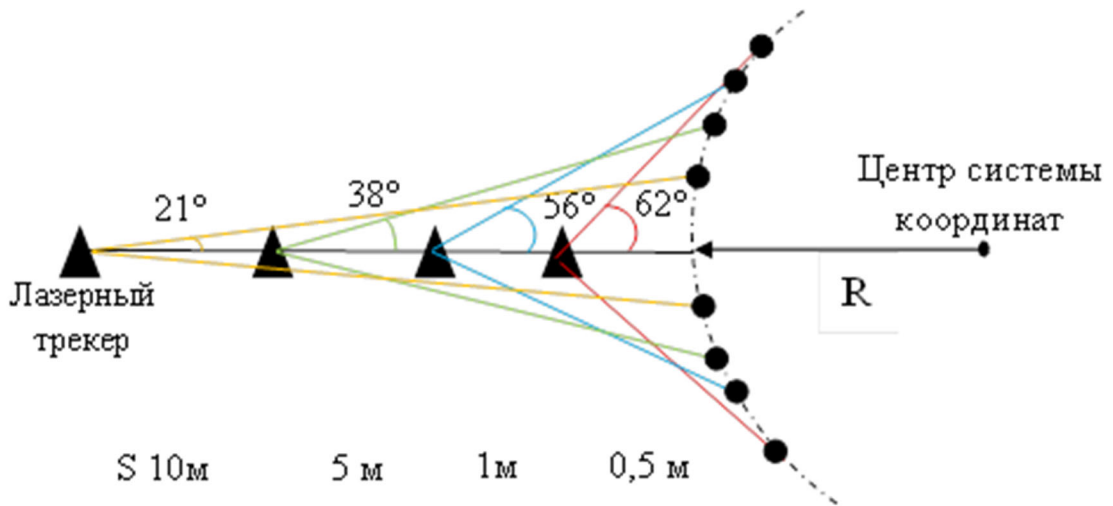


Рисунок 2.8 – Ограничения по рабочему диапазону β , в пределах которых обеспечивается допуск на выставку оборудования для расстояний S

Рассмотрим вариант установки станции внутри проектного радиуса (рисунок 2.9).

Длина L и угол β вычисляются по формулам:

$$L = \sqrt{R^2 + (R - S)^2 - 2 \cdot R \cdot (R - S) \cdot \cos \alpha}; \quad (2.13)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{(R - S)^2 + L^2 - R^2}{2 \cdot (R - S) \cdot L} \right). \quad (2.14)$$

Значения ω , φ , m_R вычисляются по формулам (2.9) – (2.11). Результаты вычислений приведены в таблице 2.2.

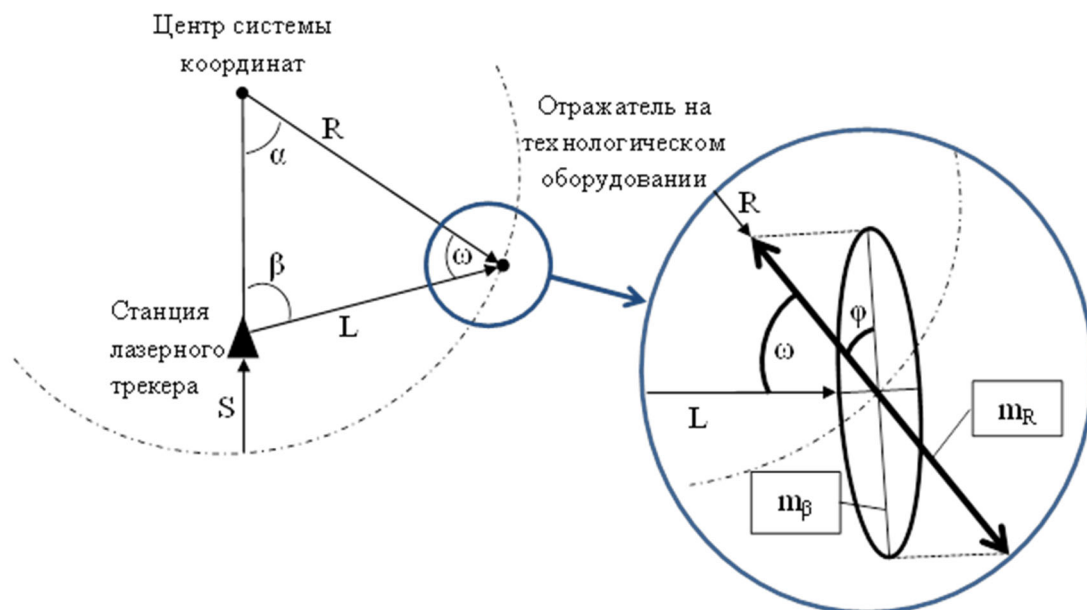


Рисунок 2.9 – Станция внутри проектного радиуса

Таблица 2.2

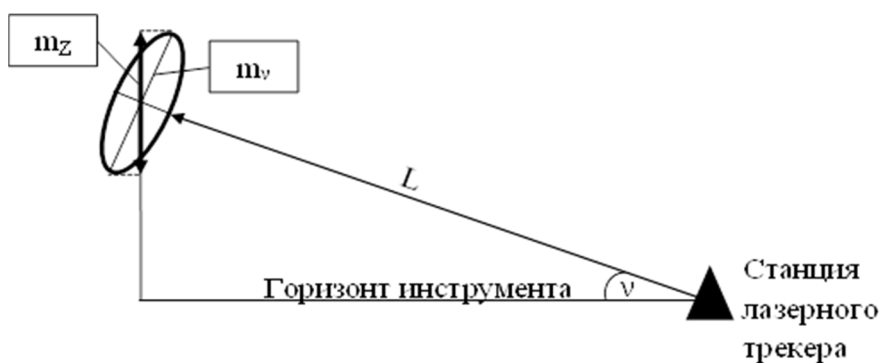
S , м	L , м	β , °	m_R , мм
0,5	9,8	63	0,050
1	10,9	60	0,050
1,5	13,1	50	0,049
2	12,8	52	0,046
5	11,2	63	0,029

Для станций, находящихся от проектного радиуса на расстоянии 0,5 и 1 м, определяются ограничения по рабочему диапазону β в 63° и 60° соответственно. Для расстояний 1,5, 2, 5 м приведены значения m_R , при $\alpha = 90^\circ$ условие (2.12) соблюдается.

Оптическая структура ускорителей и большинство технологического оборудования проектируется в единой горизонтальной плоскости. Рассмотрим зависимость m_z от изменения вертикального угла ν относительно горизонтальной плоскости для расстояний от 0,5 до 10 м. Значение m_z вычисляется по формуле

$$m_z = \cos \nu \cdot m_\nu. \quad (2.15)$$

Графическая интерпретация определения m_z представлена на рисунке 2.10.

Рисунок 2.10 – Величина m_z

Углы -59° и $+79^\circ$ определяют рабочий диапазон измерений вертикального угла для лазерных трекеров API T3 и Radian. Результаты исследований позволяют определить рабочие зоны для измерений лазерными трекерами с заданной точностью при юстировке оборудования, что в конечном итоге повышает производительность труда.

Результаты расчетов приведены на графике (рисунок 2.11).

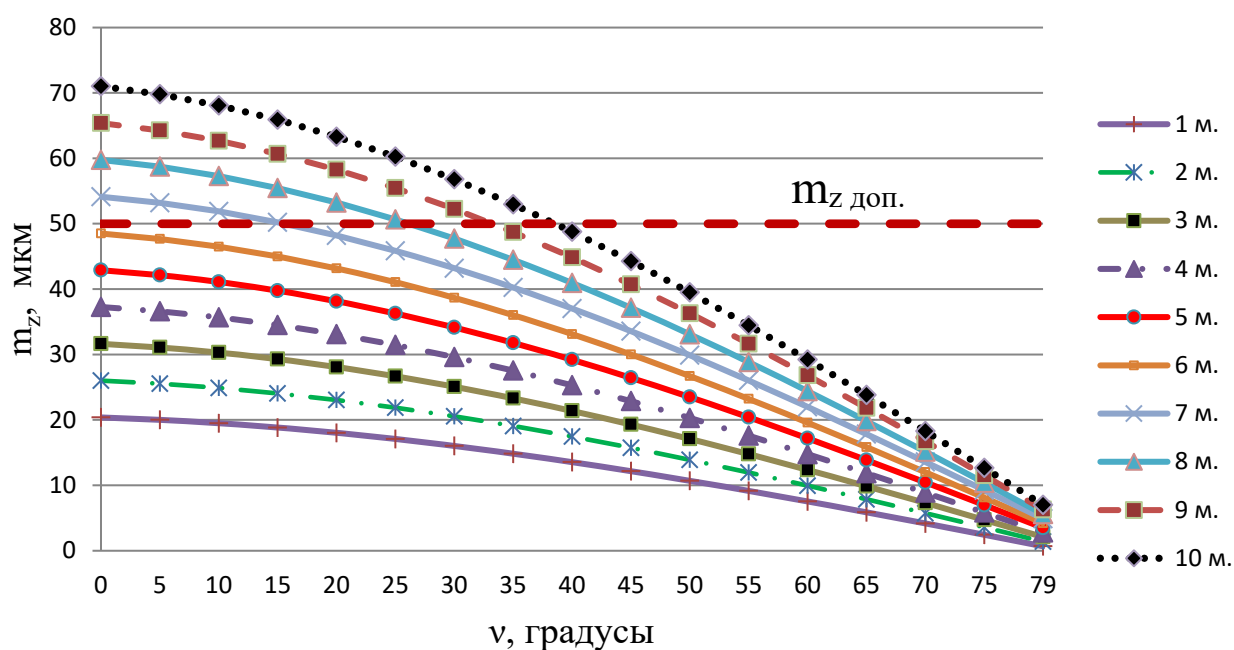


Рисунок 2.11 – График зависимости величины m_z от изменения угла ν относительно горизонтальной плоскости для расстояний от 0,5 до 10 м

2.3 Выводы по второму разделу

Определены параметры эллипсоидов погрешностей для различных расстояний на основании измерений лазерными трекерами API RADIAN Leica AT 401, Leica AT 403. Эти результаты необходимы для настройки программного продукта Spatial Analyzer, в котором производится моделирование геодезических измерений специальных сетей ускорительных комплексов по разработанной в диссертации методике.

По результатам исследования определения секторов для m_R при работе со станции лазерного трекера за кольцевой осью ($R = 10$ м) установлены следующие ограничения:

- при постановке станции от кольцевой оси на расстоянии 0,5 м – $\pm 62^\circ$;
- на расстоянии 2 м – $\pm 56^\circ$;
- на расстоянии 5 м – $\pm 38^\circ$;
- на расстоянии 10 м – $\pm 21^\circ$.

Для выделенного направления m_R при работе со станции лазерного трекера внутри кольцевой оси определены ограничения для расстояний 0,5 м – $\pm 63^\circ$ и 1 м – $\pm 60^\circ$.

По результатам исследований определения секторов для выделенного направления m_Z установлено, что условие (2.12) выполняется при расстоянии от станции лазерного трекера до отражателя в 6 м на всем рабочем диапазоне вертикального угла лазерных трекеров API T3 и Radian.

Разработанный алгоритм может быть использован для расчета определения секторов работы горизонтальных и вертикальных углов для различных допусков на установку технологического оборудования и радиусов кольцевой оси с применением лазерного трекера.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОНТАЖА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

3.1 Алгоритм расчета проектных координат специальной геодезической сети ускорительно-накопительного комплекса

Проектирование специальной геодезической сети тесно связано с проектированием самого ускорительного комплекса. Оно начинается, когда утверждена магнитная структура и известны параметры здания или тоннеля, в котором будет располагаться комплекс.

Исходными данными для проектирования специальной геодезической сети являются:

- таблицы допусков на установку в проектное положение каждого элемента магнитной структуры;
- САD-модель здания или тоннеля, в котором располагается ускоритель;
- САD-модель магнитной структуры;
- спектральная чувствительность к погрешностям установки в проектное положение магнитной структуры ускорителя.

Все эти данные формируются разработчиками ускорительного комплекса и передаются геодезической группе.

Далее геодезической группе необходимо определить инструментальный парк и типы измерительных приборов для производства работ. Методологическое обоснование решения выбора средств геодезических измерений при монтаже технологического оборудования рассмотрено в работе Хорошилова В. С. [93].

Основным элементом специальной сети является геодезический знак. От степени сложности конструкции зависит стоимость его производства. В то же время геодезический знак сети должен отвечать двум основным требованиям – сохранять свое положение в тоннеле или зале ускорительного комплекса на всем сроке эксплуатации ускорительного комплекса и иметь посадочные места для однозначной

постановки сферического отражателя лазерного трекера. Кроме разработки геодезического знака сети, необходимо выбрать места его размещения на элементах магнитной структуры. От этого зависит эффективность производства геодезических измерений для мониторинга технологического оборудования ускорительного комплекса.

Места установки геодезических знаков выбираются так, чтобы не повлиять на работоспособность магнитного элемента и из расчета доступности и видимости для производства измерений при монтаже на гирдерный модуль, и в помещении ускорителя. Например, при прямоугольном сечении электромагнита с небольшими габаритами (длина до 2 м) для пространственного контроля положения достаточно трех знаков на верхней плоскости. При больших габаритах элемента геодезические знаки устанавливаются на каждой стороне электромагнита, чтобы обеспечить их видимость при монтаже.

На элементах магнитной структуры источника СИ ESRF-EBS выделена зона верхней части всех электромагнитов для установки геодезических знаков и электронного уровня. Такой подход обеспечивает доступность и видимость знаков в тоннеле ускорителя на весь срок эксплуатации (рисунок 3.1). Если элементы устанавливаются на гирдер, сам модуль также является носителем дополнительных знаков, которые используются при монтаже в тоннеле.

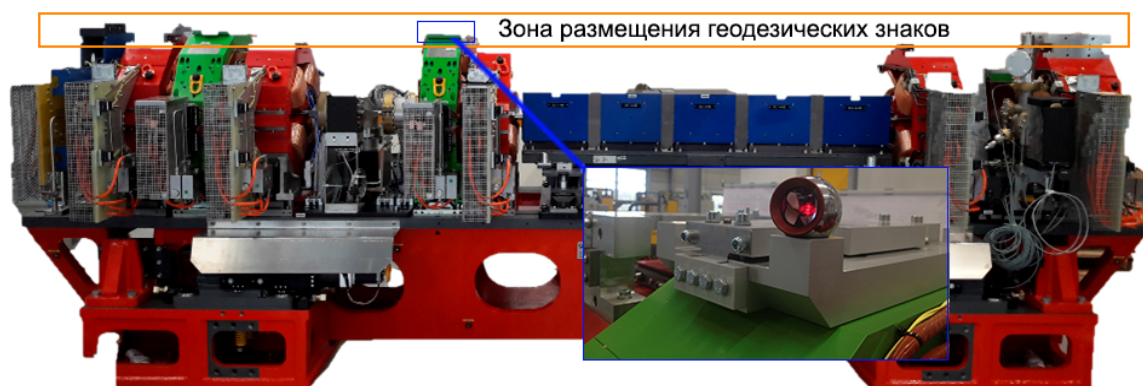


Рисунок 3.1 – Расположение геодезических знаков
на элементах основного кольца ESRF-EBS

При проектировании СГС УНК можно оперировать двумя параметрами для ее оптимизации к требованиям установки в проектное положение магнитной структуры ускорительного комплекса – расстоянием между станциями лазерного трекера и расстоянием между знаками. Из-за ограничений пространством тоннеля все измерения сети представляют собой вытянутую форму (рисунок 3.2).

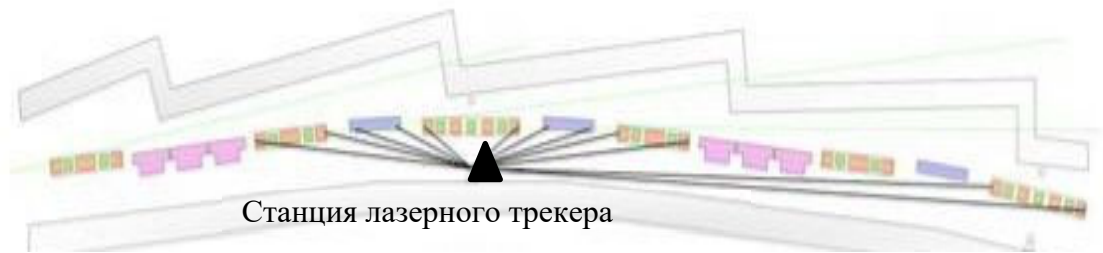


Рисунок 3.2 – Измерения в тоннеле ускорительного комплекса со станции лазерного трекера

В соответствии с рисунком 2.6 видно, что визирный луч и выделенное контролируемое направление R находятся под большими углами друг к другу. Угловые погрешности вносят наибольший вклад в точность определения положения элемента магнитной структуры. Необходимо выбрать расстояние до отражателя, при котором угловые погрешности не превышают допусков на установку в проектное положение элементов ускорителя.

Расстояния между станциями лазерного трекера определяются зонами перекрытия окружностей, радиусами которых являются принятые максимальные расстояния до отражателя. Минимальное количество знаков в зонах перекрытия – четыре. Условие необходимости минимального количества знаков определено для качественной оценки погрешности ориентирования лазерного трекера в программном продукте Spatial Analyzer [113].

Особенностью использования лазерных трекеров при производстве геодезических работ является необходимость наличия пространственной сети. Под пространственной сетью предлагается понимать геодезическую сеть, в которой положение

ее знаков, по возможности, максимально описывает пространство вокруг измеряемого объекта как в плане, так и по высоте. Сети, в которых знаки расположены на одной линии или образуют длинный вытянутый треугольник, не дают однозначного решения при ориентировании прибора (рисунок 3.3).

При модернизации специальной геодезической сети ВЭПП-4М для использования лазерного трекера на внутренней стене тоннеля были дополнительно закреплены знаки для сферического отражателя. Шаг между знаками по радиусу около 5–7 м, два последовательно расположенных знака разнесены на 1,2 м по высоте. Дополнительные знаки обеспечили достаточное их количество в зонах перекрытия между станциями, что является необходимым условием для связи измеренных полигонов в единой системе координат комплекса.

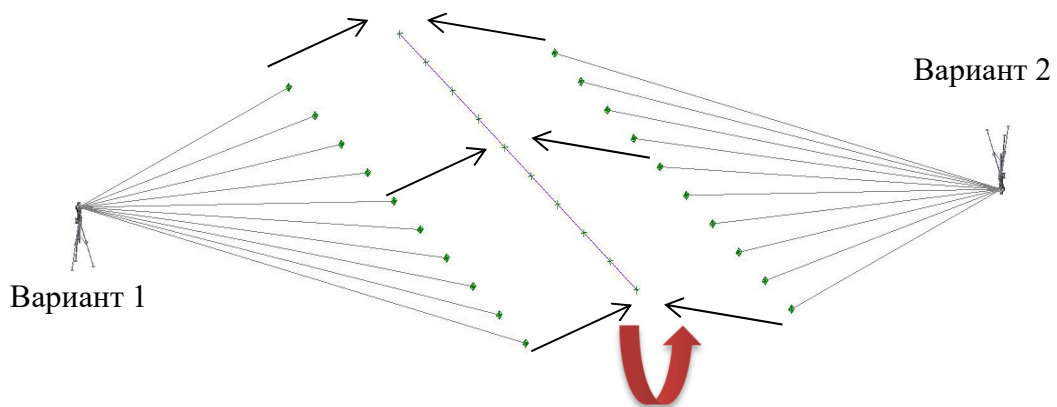


Рисунок 3.3 – Два варианта ориентирования прибора при расположении знаков на одной линии

Места закрепления геодезических знаков в зале или тоннеле ускорительного комплекса выбираются из расчета видимости при производстве измерений с нескольких станций лазерного трекера и отсутствия расположения рядом других систем обеспечения работоспособности комплекса. Технологическое оборудование источников СИ располагается ближе к внешней стене тоннеля.

Внутренняя стена тоннеля позволяет закрепить последовательно расположенные знаки по азимуту на двух высотных отметках. Нижнее высотное положение следует выбирать около +0,5 м от уровня пола тоннеля, верхнее – около +2 м.

Внешняя стена доступна для установки разряженной сети первого этапа, когда в тоннеле нет оборудования. При монтаже большая часть площади стены будет перекрыта как технологическим оборудованием ускорителя, так и другими коммуникациями (лотки кабелей, трубы дистиллята и пр.) (рисунок 3.4). Зоны для установки знаков на этой стене необходимо определить на стадии проектирования ускорительного комплекса.

После определения конфигурации сети и количества станций производят математическое моделирование геодезических измерений лазерным трекером выбранного варианта сети для оценки точности [31, 95]. Процедуры уравнивания и внесения случайных погрешностей (Measurement Simulation) будут рассмотрены в 3.2.

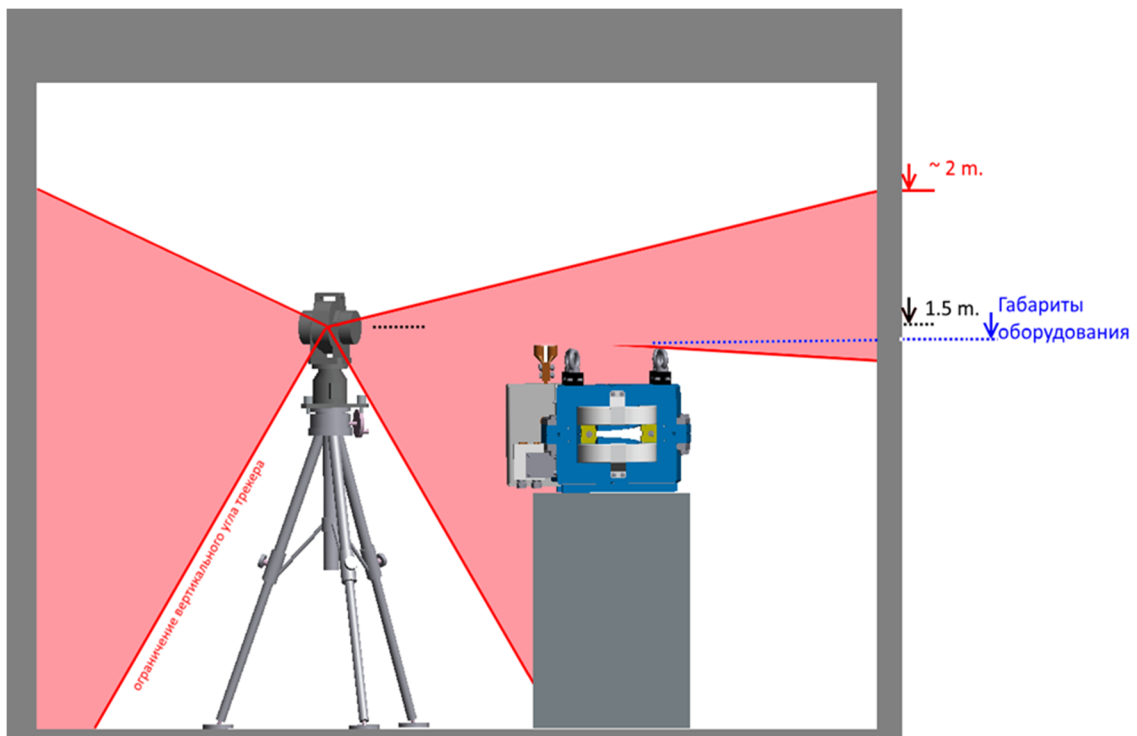


Рисунок 3.4 – Зоны установки геодезических знаков
в поперечном сечении тоннеля

По полученным значениям СКП знаков сети производят спектральный анализ для определения величин амплитуд гармоник. Зная спектральную чувствительность УНК к погрешностям установки в проектное положение технологического

оборудования, на основе сравнительного анализа необходимо сделать заключение о возможности реализации данного варианта сети.

Основные достоинства и отличие разработанной автором методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения заключаются в следующем:

- основанием для моделирования измерений в специальной геодезической сети являются исследования параметров эллипсоидов погрешностей определения отражателя и расчеты оптимальных секторов при монтаже технологического оборудования с применением лазерного трекера;

- выполнение проектирования СГС в единой среде (САД-программы) с разработчиками уникального ускорительно-накопительного комплекса.

Схема построения СГС УНК приведена на рисунке 3.5.

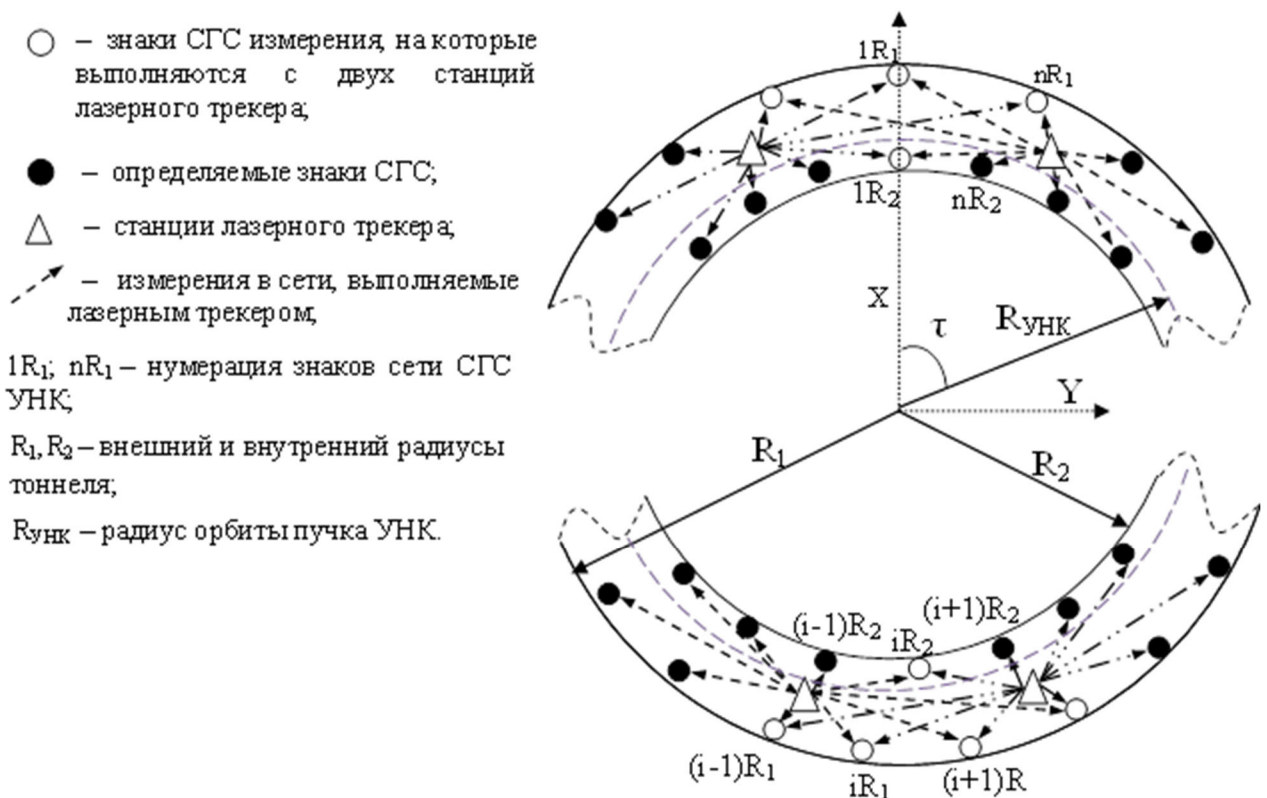


Рисунок 3.5 – Схема построения специальной геодезической сети УНК

Разработанная схема методики геодезического обеспечения показана на рисунке 3.6.

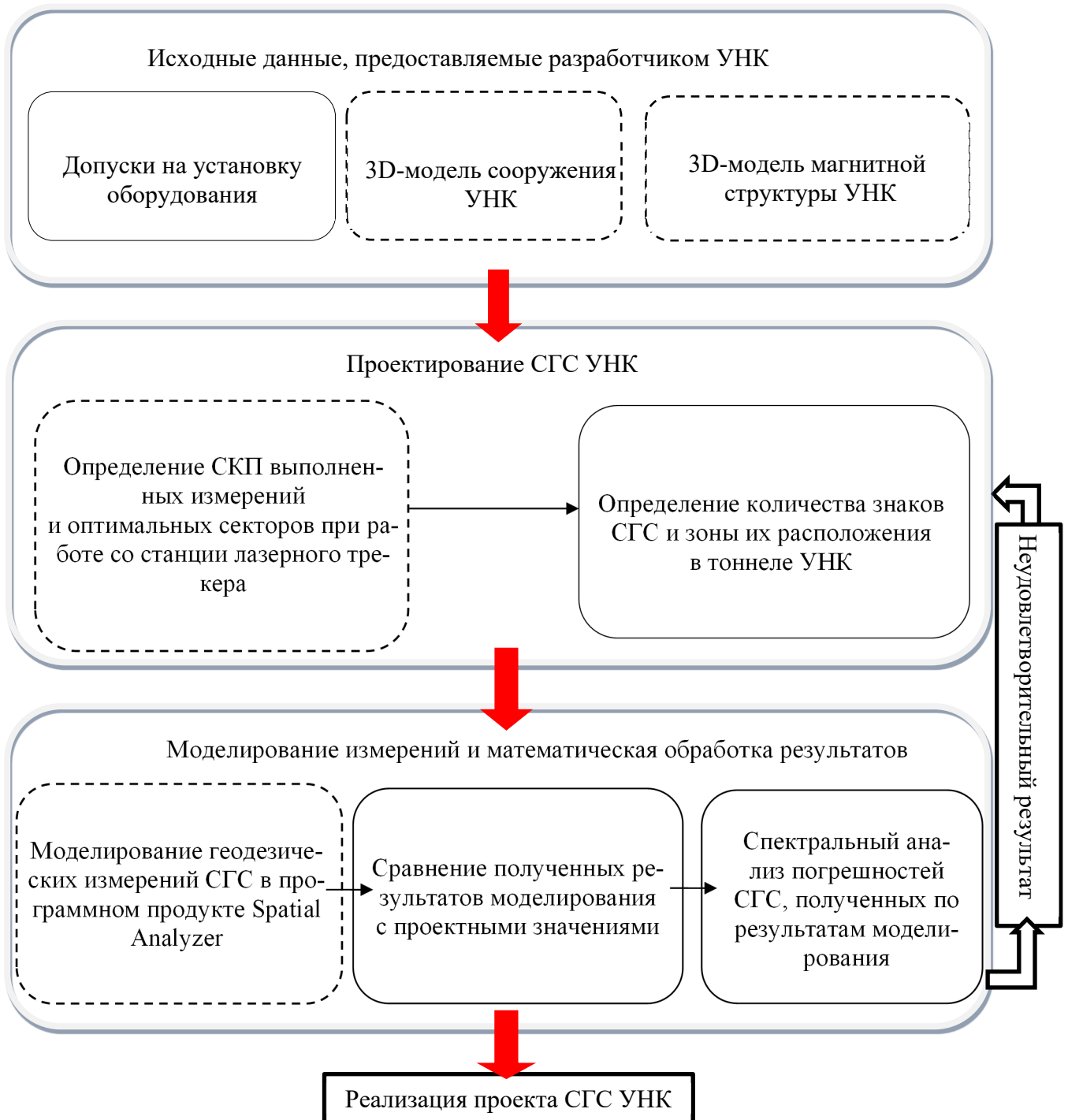


Рисунок 3.6 – Схема методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения (пунктиром обозначены новые блоки)

Автором диссертационного исследования разработан алгоритм расчета проектных координат, количества знаков сети специальной геодезической сети и станций лазерного трекера для последующего моделирования измерений. Выделим основные этапы:

– выбор системы координат. Система координат сети совпадает с системой координат ускорителя, в которой R – радиальное положение радиусных и прямолинейных участков орбиты ускорителя; τ – горизонтальный угол положения элементов структуры ускорителя; Z – высотное положение;

– вычисление расстояний L_1 и L_2 , где L_1 – максимальная длина при монтаже технологического оборудования УНК; L_2 – максимальная длина при измерении знаков сети, при ориентировании лазерного трекера в систему координат (рисунок 3.7).

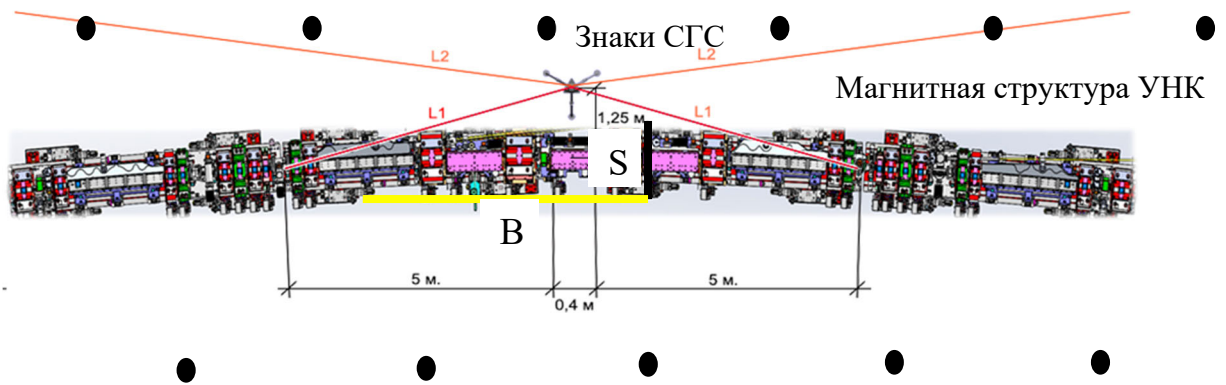


Рисунок 3.7 – Схема измерений со станции лазерного трекера при монтаже оборудования ускорительно-накопительного комплекса

Расчет расстояний L_1 , L_2 для основного кольца источника СИ СКИФ:

$$L_1 = \sqrt{S^2 + B^2} = \sqrt{1,25^2 + 5,2^2} = 5,3 \text{ м}; \quad (3.1)$$

$$L_2 = \frac{L_1 \cdot m_{R,Z_{\text{доп}}}}{\sqrt{m_S^2 + m_{\beta,v}^2}} = 10,6 \text{ м}, \quad (3.2)$$

где B – катет (длина гирдера основного кольца источника СИ СКИФ) в прямоугольном треугольнике $L_1 S B$;

– вычисление проектных координат СГС УНК. Радиальное положение соответствует радиусам внешнего и внутреннего стен тоннеля комплекса.

Азимутальный угол между знаками выбирается из расчета зоны перекрытия между станциями лазерного трекера с учетом требования минимального их количества. Вычисление азимутального угла производится по формуле:

$$\tau_{R_{1,2}} = \frac{(L_2 / 2) \cdot 180}{\pi \cdot R_{1,2}}, \quad (3.3)$$

где R_1 – внешний радиус стены тоннеля; R_2 – внутренний радиус.

Знаки, условно принятые за первые, принадлежащие внешней и внутренней стене тоннеля, имеют одинаковый начальный азимутальный угол. Для равномерного распределения знаков необходимо задать начальные углы. В каждом проекте сети они выбираются индивидуально.

Высотное положение знаков при проектировании сети ускорительного комплекса следует оптимально установить +0,5 м от пола – для условно первого знака на стене тоннеля внешнего радиуса и +2 м – для второго и далее с чередованием. Для первого знака на стене внутреннего радиуса +2 м и +0,5 м для второго и далее с чередованием;

– вычисление общего количества знаков производится по формуле

$$N = \frac{360}{\tau_{R_1}} + \frac{360}{\tau_{R_2}}; \quad (3.4)$$

– определение координат положения станций инструмента. Радиальное положение:

$$R_{ст.} = R - 1, \quad (3.5)$$

где R – радиальное положение орбиты пучка частиц, м.

Угол между станциями вычисляется по формуле

$$\tau_{\text{ст.}} = \frac{L_2 \cdot 180^\circ}{\pi \cdot R_{\text{ст.}}} \quad (3.6)$$

3.2 Исследования по выбору программных продуктов для математической обработки специальной геодезической сети ускорительно-накопительного комплекса

3.2.1 Программный продукт Spatial Analyzer

Spatial Analyzer – программный продукт, используемый при геодезических работах с применением лазерных трекеров. Производитель New River Kinematics, с 2012 года входит в группу компаний Гексагон (Hexagon Manufacturing Intelligence). Spatial Analyzer – многофункциональный программный продукт, решающий задачи управления высокоточными координатно-измерительными приборами (лазерные трекеры, тахеометры, измерительные руки, лазерные радары и т. д.), обработки полученных данных и их вывода в виде отчета. Стоимость – 45 тысяч евро – является основным минусом при выборе данного программного продукта для использования в разрабатываемой методике. Однако при создании УНК стоимость программного обеспечения включена в смету реализации проекта.

Основными функциями Spatial Analyzer при производстве измерений лазерным трекером являются [113]:

- модуль управления лазерного трекера, который позволяет использовать все возможности подключенного прибора к программе;
- функции ориентирования прибора в системе координат объекта, основная из которых «Best-fit» – ориентирование по координатам геодезических знаков в системе объекта;
- функционал построения геометрических примитивов и систем координат;
- импорт проектных координат знаков или САД-моделей в заданной системе координат;

- экспорт измеренных координат точек на объекте или геометрических примитивов в требуемом формате;
- формирование отчета с экспортом в формат pdf или doc.

Данные функции программного продукта используются при геометрическом контроле изделия и при монтаже технологического оборудования в проектное положение. Использование Spatial Analyzer в разрабатываемой методике определено модулями уравнивания – Unified Spatial Metrology Network (USMN) и моделированием геодезических измерений – Measurement Simulation.

Модуль USMN или создание пространственных высокоточных сетей используется для получения уравненных значений координат геодезических знаков, измеренных с нескольких станций. Два варианта использования функции позволяют производить уравнивание линейно-угловых данных измерений либо только полученные координаты. Основное рабочее окно функции USMN представлено на рисунке 3.8.

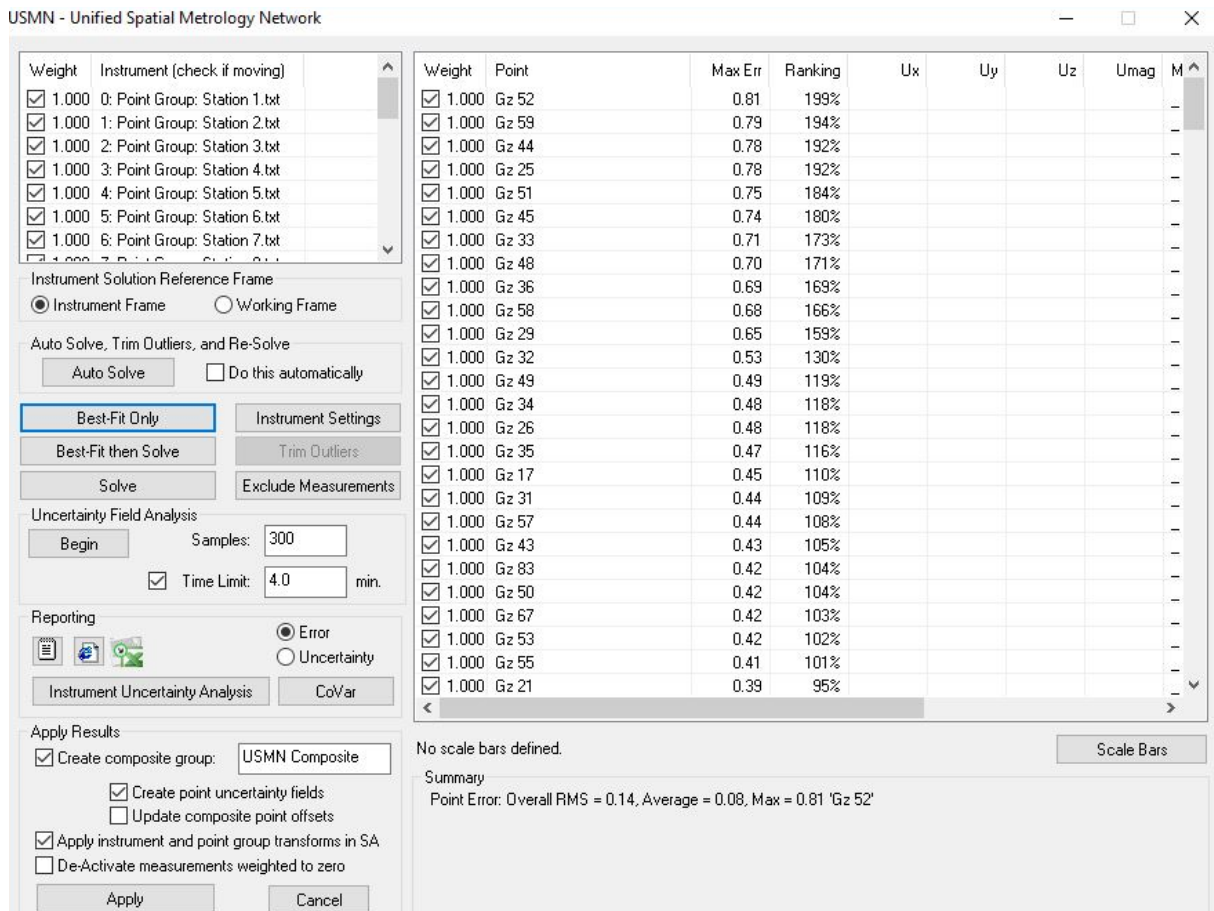


Рисунок 3.8 – Основное окно модуля Unified Spatial Metrology Network

Ориентирование прибора в систему координат объекта основано на методе наименьших квадратов [39]:

$$p^* = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\beta,l} = \min, \quad (3.7)$$

где p^* – положение станции; $\varepsilon_{\beta,l}$ – угловые и линейные невязки между измеренными и исходными значениями; n – количество измеренных со станции знаков.

Графическая интерпретация ориентирования прибора (по трем знакам) представлена на рисунке 3.9.

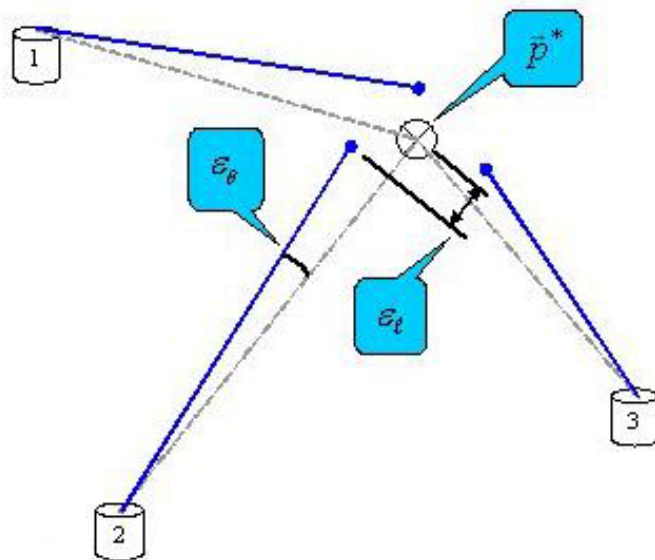


Рисунок 3.9 – Ориентирование прибора относительно знаков сети

Для получения корректных высотных отметок знаков сети на каждой станции лазерного трекера производят определение оси Z (горизонтирование) инструмента по внутреннему электронному уровню. После введения этого дополнительного условия в результаты уравнивания в модуле USMN не дают сходимости. Для устранения этой проблемы разработчик рекомендовал пользоваться функцией уравнивания по полученным в результате измерений координатам. Необходимо

экспортировать координаты измеренных знаков в системе координат станции в новый файл программы и уравнивать.

Сравнение результатов измерений с определением оси Z лазерного трекера по электронному уровню на каждой станции двух вариантов уравнивания функции USMN показано на рисунке 3.10, где RMS – СКП по результатам измерений всех знаков в сети; average – среднее значение; max – максимальное отклонение измерения на геодезический знак сети.

Для оценки точности полученных отметок по результатам уравнивания было произведено исследование на ускорительном комплексе ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН. При сравнении с результатами нивелирования по знакам сети СКП составила 0,2 мм для периметра 366 м.

Summary	
Point Error: Overall RMS = 14.3498, Average = 5.3577, Max = 143.4465 'Gz 88'	а
System Solution Time: 1.5 sec, Robustness Factor = 0.000072, Unknowns 156, Equations 1500	
Summary	
Point Error: Overall RMS = 0.07, Average = 0.05, Max = 0.38 't073'	б
System Solution Time: 1.5 sec, Robustness Factor = 0.000002, Unknowns 156, Equations 1500	

Рисунок 3.10 – Результаты уравнивания сети с определением оси Z лазерного трекера по электронному уровню на каждой станции:

а) по линейно-угловым измерениям; б) по координатам

Ранжирование (ranking) – удобный критерий оценки качества произведенных измерений. Значение более 100 % указывает на наличие большой погрешности при измерении на данном геодезическом знаке. Для уменьшения показателя ranking пользователю доступно изменение веса измерения с каждой станции инструмента на выбранный знак либо исключение измерения из обработки.

Функция Measurement Simulation – моделирование геодезических измерений – позволяет производить предрасчет точности проектируемой сети. Программа

моделирует стандартные нормально распределенные случайные числа по методу Бокса – Мюллера на основании заданных линейно-угловых погрешностей прибора.

Настройки погрешностей лазерных трекеров и тахеометров для проведения моделирования измерений по умолчанию приведены на рисунке 3.11.

Для сравнения измерений, полученных по результатам моделирования в Spatial Analyzer, с реальными измерениями было проведено следующее исследование.

Tracker / EDM Theodolite Uncertainty	
Angle Measurement (arcseconds)	
Theta or Horizontal Angle	1.0
Phi or Vertical Angle	1.0
Distance Measurement	
Error (in job distance units)	0.00762
Parts per million	2.5

Рисунок 3.11 – Значения линейно-угловых СКП лазерного трекера в Spatial Analyzer по умолчанию

За основу взяты координаты центров сферического отражателя, полученные по результатам геодезических измерений лазерным трекером API RADIANT, описанные в 2.1. Количество измерений совпадает. Результаты моделирования измерений в модуле Measurement Simulation приведены на рисунке 3.12.

Сравнивая с результатами измерений, проводимых в компараторной ИЯФ СО РАН (см. рисунок 2.2), установлено, что полученные СКП измерения расстояний не соответствуют истине. Размеры эллипсоидов погрешностей с настройками погрешностей инструмента по умолчанию изменяются в зависимости от расстояния (рисунок 3.13).

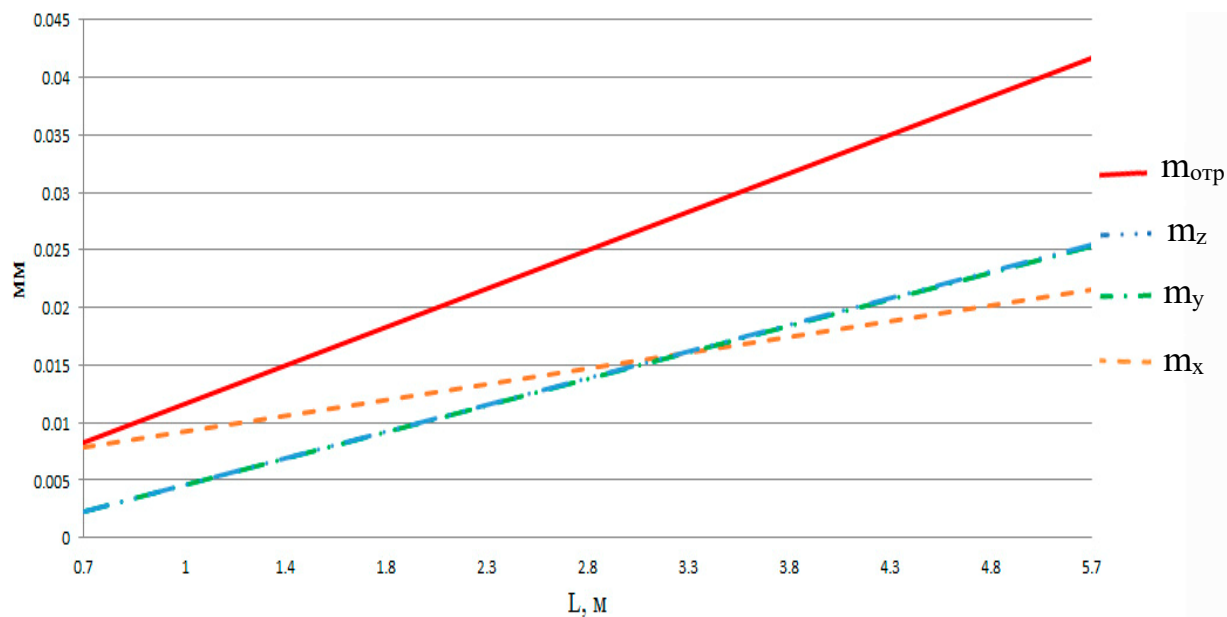


Рисунок 3.12 – График зависимости погрешностей лазерного трекера API RADIAN по результатам моделирования в ПО SpatialAnalyzer

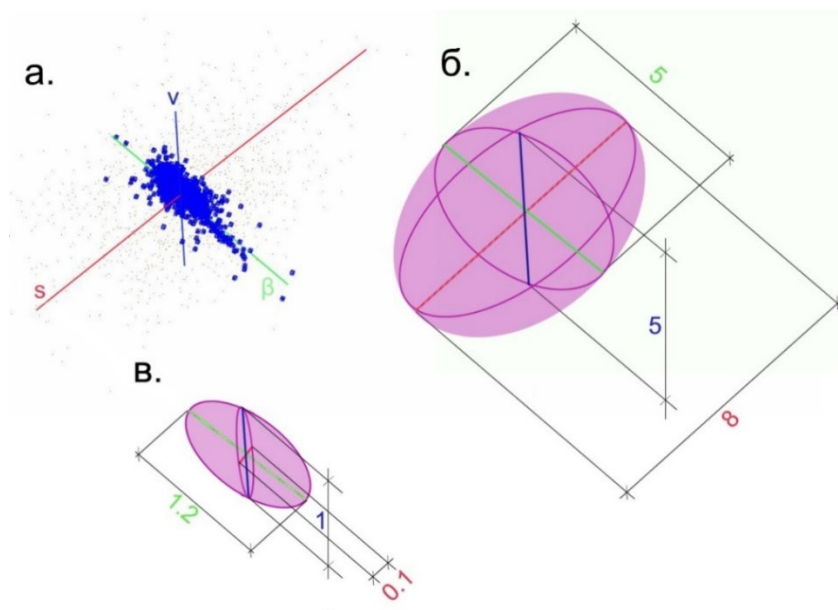


Рисунок 3.13 – Сравнение повторяемости геодезических измерений положения отражателя на расстоянии 1 м, полученных трекером API Radian и моделированием измерений в Spatial Analyzer: а) общий вид набора точек с указанием осей; б) эллипсоид погрешностей с величинами осей, в мкм, полученный по результатам моделирования; в) эллипсоид погрешностей с величинами осей, полученный по результатам измерений трекера API Radian, в мкм

Анализ результатов геодезических измерений показывает на необходимость изменения значения настроек distance measurement в модуле Measurement Simulation. Внесение паспортных значений СКП измерения расстояний (рисунок 3.14) в настройки модуля и повторное моделирование измерений позволило получить сопоставимые с реальными измерениями результаты.

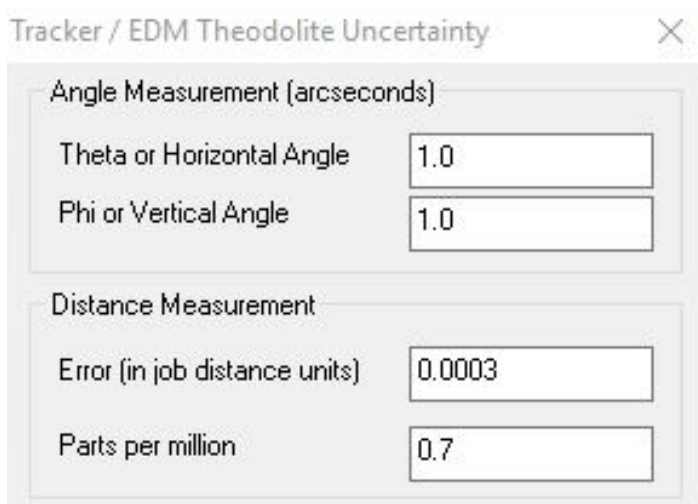


Рисунок 3.14 – Значения линейно-угловых СКП лазерного трекера в Spatial Analyzer с внесенными паспортными значениями API RADIAN

Полученные результаты моделирования в Spatial Analyzer с внесенными паспортными значениями погрешностей инструмента (рисунок 3.15) позволяют производить моделирование геодезических измерений в проектируемой специальной сети УНК с учетом влияний внешней среды на измерения и погрешностей измерительной системы (несоосность центра призмы со сферической оболочкой отражателя лазерного трекера, ошибки установки отражателя на специальные переходники или адаптеры для производства измерений и т. д.).

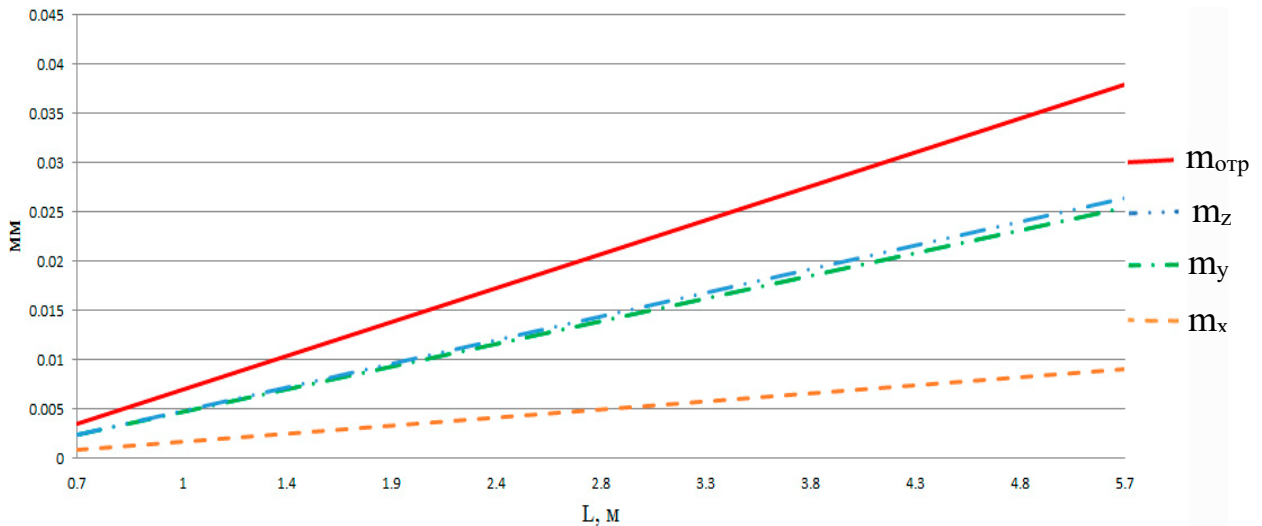


Рисунок 3.15 – График зависимости СКП по результатам моделирования с внесенными изменениями в настройки модуля Measurement Simulation

3.2.2 Программный продукт PANDA

Software Package for Adjustment of Networks and Deformation Analysis (PANDA) – программный продукт для уравнивания геодезических сетей и деформационного анализа. Широко используется в Германии и странах Евросоюза. Адаптация для работы с сетями ускорительных комплексов началась после сотрудничества разработчика Geodetical Technologies с исследовательским центром по физике частиц Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) [101].

В диссертационной работе проведено сравнение результатов уравнивания, полученных в Spatial Analyzer и Panda. Необходимость исследования обусловлена неудовлетворительным результатом уравнивания линейно-угловых данных измерений лазерного трекера в Spatial Analyzer измерения специальных сетей ускорителей ИЯИ СО РАН. Исследования всех функций программного пакета PANDA затруднялись из-за ограничения функционала и срока пользования демоверсии.

Для уравнивания в PANDA специальной геодезической сети по линейно-угловым измерениям лазерного трекера необходимо наличие проектных координат или нулевого цикла измерений сети. Данные последующих циклов загружаются

в подкатегории – эпохи. Такая структура позволяет производить независимые расчеты каждого цикла измерений (рисунок 3.16). Перед работой с файлами измерений в настройках проекта требуется указать локальную систему координат. Для уравнивания свободной сети необходимы координаты всех станций, с которых производились измерения.

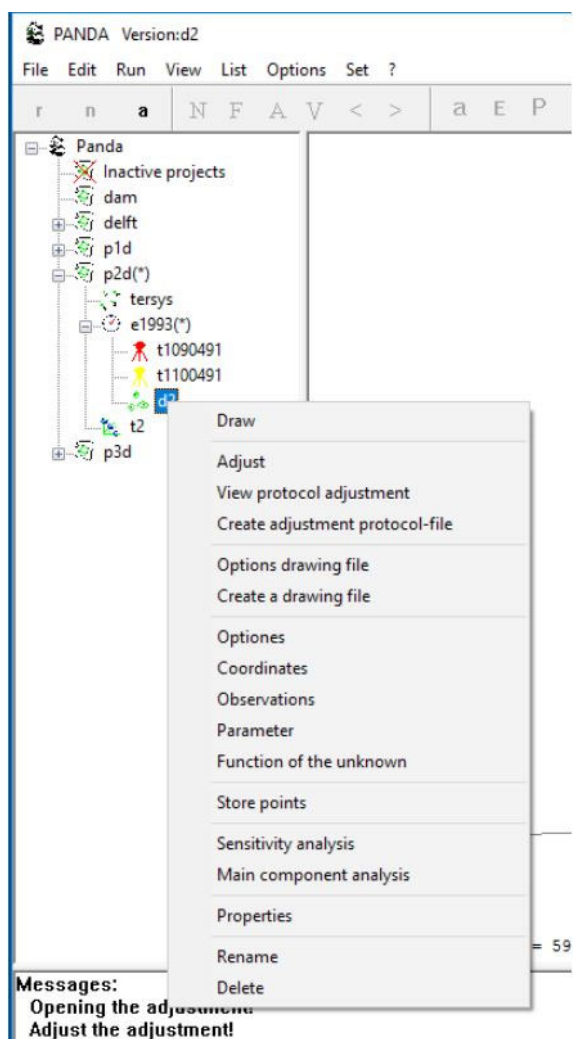


Рисунок 3.16 – Рабочее окно программного продукта PANDA с отображением опций уравнивания измерений

Импорт измерений лазерного трекера возможен несколькими способами. Самым эффективным оказался импорт через файл в формате *.xls, который является экспортом из файла измерений Spatial Analyzer. После импортирования необходимо воспользоваться функцией reduction для преобразования в базе данных

программы результатов измерений. В опциях функции уравнивания необходимо выбрать Dimension – 3D (преобразование по трем координатам) и Standard for the adjustment – L2 (выбор метода преобразования – метод наименьших квадратов).

Важной частью процесса уравнивания является поиск ошибок результатов измерений в процессе уравнивания. Графически измерения, содержащие большие погрешности измерений, выделяются красным цветом. При нахождении ошибок пользователю предоставляется возможность проанализировать результаты в окне observation. Основным критерием определения ошибки является столбец normalized residual – нормализованный остаток. Критерий основан на построении доверительного интервала по распределению Стьюдента. Значение в столбце normalized residual более 5 для измерения сообщает пользователю о наличии ошибки, выходящей за доверительный интервал. Изменение параметра factor с 1 на 10 изменяет вес данного измерения при уравнивании (рисунок 3.17).

В случае если нормализованный остаток для измерений со станции не уменьшается, необходимо изменить СКП измерений со станции с заданных по умолчанию на полученные в ходе уравнивания сети. Эти настройки находятся в контекстном меню импортированных измерений и станций лазерного трекера. По результатам процесса уравнивания выводится подробный отчет. В нем содержатся информация о СКП измерений с каждой станции, каталог координат после уравнивания, параметры эллипсов погрешностей.

Station	Target sta...	observation[gon/m]	*factor	*use	Resi.[m...	N...	redund
4	r003	102.18667	1.00	yes	-0.907	0.79	0.
3	r003	103.76967	1.00	yes	0.534	0.79	0.
4	r047	107.80244	1.00	yes	0.321	0.62	0.
3	r047	106.13533	1.00	yes	-0.459	0.62	0.
1	r043	101.81078	1.00	yes	-0.529	0.55	0.
1	r006	101.66822	1.00	yes	0.499	0.35	0.
3	r005	106.25789	1.00	yes	-0.246	0.32	0.
4	r005	103.49522	1.00	yes	0.458	0.32	0.
3	r006	104.70311	1.00	yes	-0.194	0.10	0.
3	ida	103.57478	1.00	yes	0.274	0.03	0.
4	r009	102.61400	1.00	yes	0.368	0.99	0.
3	r002	107.72444	1.00	yes	0.229	0.82	0.
4	r002	104.63200	1.00	yes	-0.368	0.80	0.
4	r003	49.53878	1.00	yes	0.089	0.58	0.
2	ida	103.44278	1.00	yes	-0.324	0.58	0.
4	r046	107.76556	1.00	yes	0.192	0.33	0.

Рисунок 3.17 – Изменение величины factor при обнаруженных ошибках, выходящих за доверительный интервал при уравнивании

3.2.3 Исследование результатов уравнивания геодезических измерений программными продуктами Spatial Analyzer и PANDA

В исследовании рассмотрено уравнивание результатов моделирования измерений спроектированной сети и результатов измерений сети ускорительного комплекса ВЭПП-4М, проведенных в сентябре 2019 г.

Средний периметр спроектированной сети для исследования составил 52,5 м. Выбранная величина периметра позволяет произвести уравнивание в программном продукте Spatial Analyzer по данным измерений с каждой станции лазерного трекера (измеренные углы и длины линий) и сравнить результаты двух программных продуктов. Радиальное положение знаков: внутренний радиус 7 м, внешний 10 м. Центр окружностей принадлежит центру системы координат. Знаки на внутреннем радиусе именуется GR-1, 2..., на внешнем – GL-1, 2.... Все знаки, принадлежащие внутреннему радиусу, имеют нулевую отметку; первый знак внешнего радиуса +0,5 м, второй +2 м и далее с чередованием. Ось Z системы координат направлена вверх. Ось X направлена на знаки GR1 и GL1. Ось Y дополняет систему до правосторонней. Азимутальный угол между знаками для внешнего радиуса 15° , внутреннего – 40° .

Моделирование измерений произведено в модуле Measurement Simulation программного продукта Spatial Analyzer. Результаты измерений были экспортированы в PANDA для уравнивания. В Spatial Analyzer данные уравнены с помощью функции USMN.

Количество знаков в сети – 33. Количество станций лазерного трекера – 9. Количество измеренных углов – 180, расстояний – 90.

Линейно-угловые погрешности измерений с каждой станции лазерного трекера указаны в таблице А.1 приложения А. Схема измерений сети в программных продуктах Spatial Analyzer и PANDA приведена на рисунке 3.18.

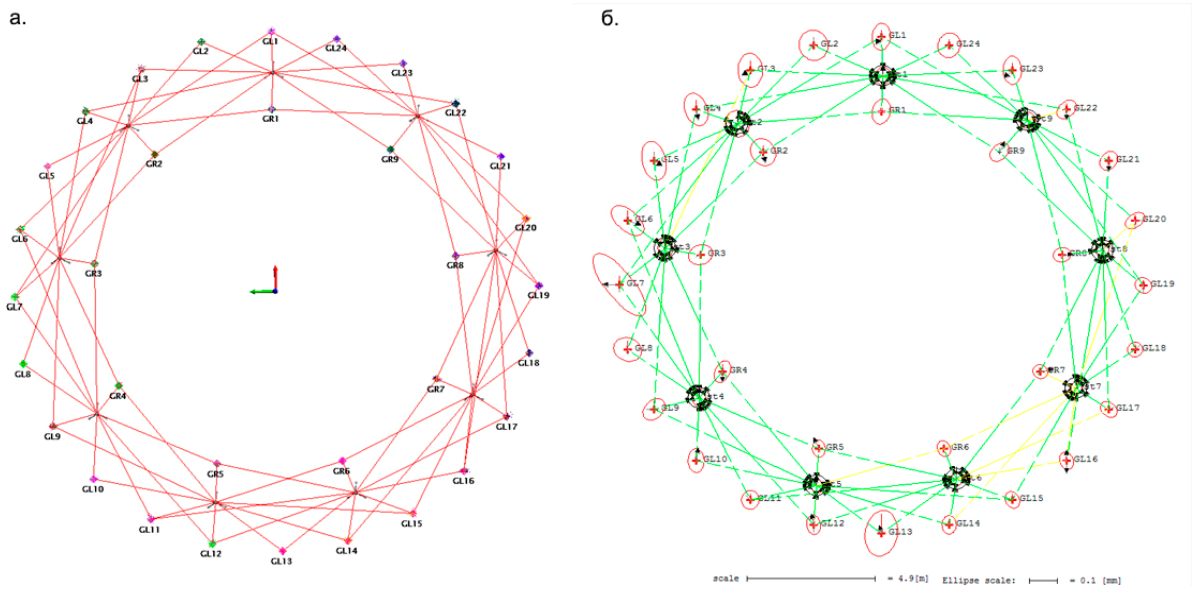


Рисунок 3.18 – Схема измерений сети периметром 52,5 м:

а) в программном продукте Spatial Analyzer;

б) в программном продукте PANDA

СКП положения знаков по трем координатам в сети по результатам уравнивания в SA 0,020 мм, в PANDA – 0,048 мм. Максимальная погрешность определения координат знака сети со станции в Spatial Analyzer составила 0,080 мм (GL3), в PANDA – 0,067 мм (GL13).

Для сравнения результатов уравнивания реальных измерений лазерного трекера был взят цикл 2019 г. специальной геодезической сети комплекса ВЭПП-4М. За исходные данные взяты проектные координаты положения геодезических знаков в системе комплекса. Координаты Z в исходных данных – высотные отметки по результатам высокоточной нивелирования 2019 г. [25, 28, 62, 112]. Общее количество геодезических знаков – 94. Количество станций лазерного трекера – 27.

Из-за проблемы Spatial Analyzer, рассмотренной в 3.2.1, уравнивание производилось функцией USMN по координатам геодезических знаков. В программном продукте PANDA – по данным измеренных углов и расстояний.

Координаты знаков сети, полученные по результатам уравнивания, были сориентированы к проектным координатам по методу наименьших квадратов. СКП

положения знаков по результатам уравнивания относительно исходных указаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Источник данных уравнивания	X, мм	Y, мм	Z, мм
SA	0,969	1,336	0,145
PANDA	1,040	1,280	1,311

Отклонения координат знаков, полученных по результатам уравнивания обоих программных продуктов, в плане отличаются незначительно (рисунок Б.1 приложения Б). Отклонения порядка 1–1,5 мм вызваны деформациями тоннеля за период эксплуатации ускорительного комплекса [49, 53].

Как и в Spatial Analyzer, результаты уравнивания по данным измерений углов и расстояний в PANDA оказались неудовлетворительны для высотного положения знаков. Разработчик Geodetical Technologies указал на необходимость загрузки дополнительного файла с результатами измерений цифровым нивелиром [89]. В случае отсутствия результатов измерений цифровым нивелиром, уравнивание необходимо проводить по методике тахеометрических ходов. Возможность проверки этих рекомендаций не была проверена из-за окончания срока демоверсии программы. СКП высотного положения по результатам уравнивания в SA относительно результатов нивелирования того же года составила 0,145 мм.

Для сетей крупных ускорительных комплексов, таких как ВЭПП-4М с периметром 366 м, использование программных продуктов Spatial Analyzer и PANDA является допустимым с учетом выявленных особенностей. Преимуществом PANDA является уравнивание данных измерений углов и расстояний, однако необходимо произвести исследование корректности уравнивания данных лазерного трекера по методике тахеометрического хода. Уравнивание в Spatial Analyzer по координатам корректно при наличии данных нивелирования произведенного в тот же период, что и измерения сети лазерным трекером.

3.3 Выбор оптимального варианта геодезической сети на основе алгоритма разработанной методики в программном продукте Spatial Analyzer

Произведены расчеты и моделирование геодезических измерений трех вариантов сети для тоннеля со средним периметром 282,7 м [66]. Кольцо с радиусом 45 м является аналогом тоннеля комплекса ВЭПП-4М без прямолинейных вставок. Габариты тоннеля: высота 4 м, ширина 3 м, радиус внутренней стены 43,5 м, радиус внешней стены 46,5 м.

Как указывалось в 2.2, для используемых в ИЯФ СО РАН лазерных трекеров фирмы API диапазон измерения вертикального угла относительно горизонта прибора $+79^\circ$ и -59° . Это обуславливает наличие недоступных зон для производства измерений. Размеры зон для тоннеля высотой 4 м указаны на рисунке 3.19.

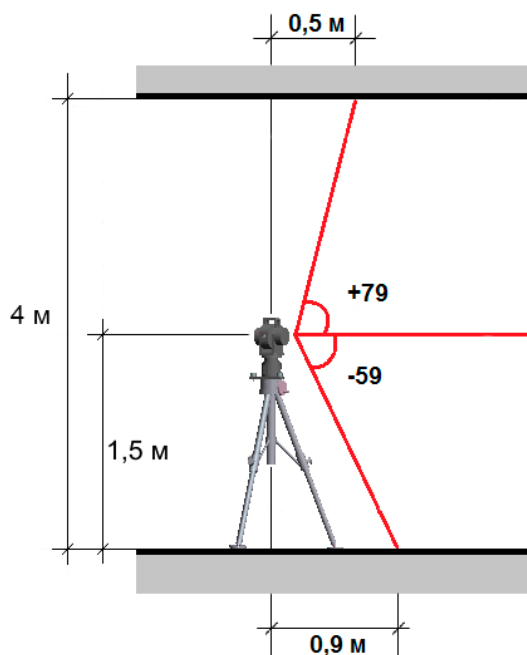


Рисунок 3.19 – Недоступные зоны измерений вертикального угла лазерного трекера API для выбранной высоты тоннеля 4 м

Произведен расчет проектных координат для трех вариантов сети по алгоритму, рассмотренному в 3.1. В каждом варианте изменялись расстояния между знаками и станциями лазерного трекера. Проектные координаты загружались

в Spatial Analyzer. Сеть разделялась на сегменты по 8 знаков + станция, для моделирования измерений лазерным трекером с использованием модуля Measurement Simulation. Уравнивание полученных данных производилось в модуле USMN. Полученные уравненные значения координат были сориентированы к проектным по методу наименьших квадратов.

Величины СКП по радиальной и высотной координатам высчитывают относительно проектных значений. Спектральный анализ погрешностей положения знаков геодезической сети на этапе проектирования позволяет выбрать наилучшую схему измерений. Для определения величин амплитуд погрешностей положения знаков сети (a_k) в поперечных направлениях движению пучка (R, Z) произведен гармонический анализ для каждого варианта сети по известным формулам [38]:

$$a_k = \sqrt{b_k^2 + c_k^2}; \quad (3.8)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \Delta X_i \times \cos\left(\frac{2\pi k D_i}{C}\right); \quad (3.9)$$

$$c_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N X_i \times \sin\left(\frac{2\pi k D_i}{C}\right), \quad (3.10)$$

где $\Delta X_i = \Delta R_i$ – для радиального положения знаков; $\Delta X_i = \Delta Z_i$ – для высотного; N – количество рассматриваемых знаков сети; D_i – продольная координата i -го знака; C – периметр; k – номер гармоники.

Параметры СГС УНК рассматриваемых вариантов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Вариант СГС	Количество знаков в сети	Расстояние между знаками (м)		Центральные углы (°)		Количество станций лазерного трекера
		Внешний радиус	Внутренний радиус	Внешний радиус	Внутренний радиус	
1	112	8,3	7,8	6,4	6,3	28
2	162	3,6	3,3	4,4	4,3	41
3	378	1,5	1,4	1,9	1,8	95

Высотное положение знаков: первый знак внешнего радиуса на отметке +0,5 м, второй +2,5 м и далее с чередованием; на внутреннем радиусе первый знак на отметке +2,5 м, второй +0,5 м и далее с чередованием. Положение знаков по высоте одинаковы для всех вариантов сети.

Схема измерений лазерным трекером в первом варианте сети в Spatial Analyzer представлена на рисунке 3.20.

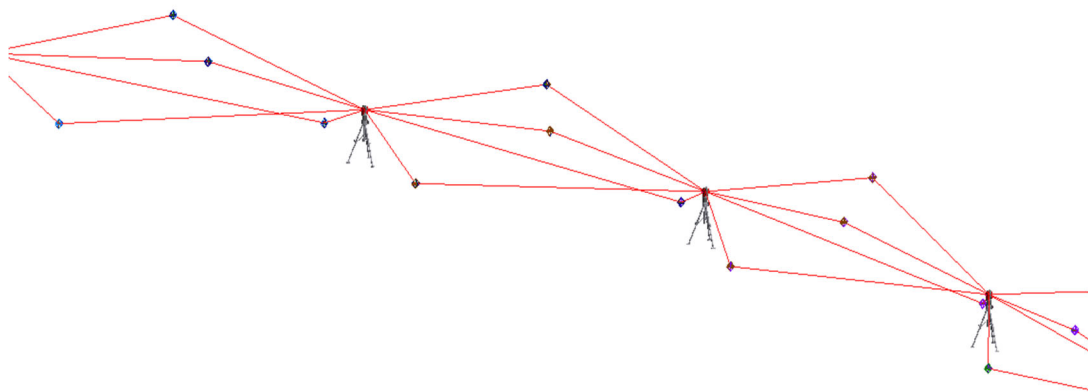


Рисунок 3.20 – Графическое отображение в Spatial Analyzer смоделированных измерений для варианта сети № 1 с шагом между станциями 10 м

Уравнивание специальной геодезической сети в Spatial Analyzer с использованием функции USMN для сети варианта № 1 дало следующие результаты: СКП положения знака по результатам измерений одного цикла 0,015 мм; отклонение от проектных координат – 0,27 мм.

Для удобства анализа СКП все результаты были рассмотрены в цилиндрической системе координат. На графиках (рисунки 3.21, 3.22) представлены отклонения измеренных значений положения геодезических знаков сети по радиальному и вертикальному направлениям до уравнивания и после.

Резонансными гармониками для ускорительных комплексов являются близкие к частоте бетатронных колебаний, а также суммарные и разностные гармоники числу магнитных элементов, суперпериодов.

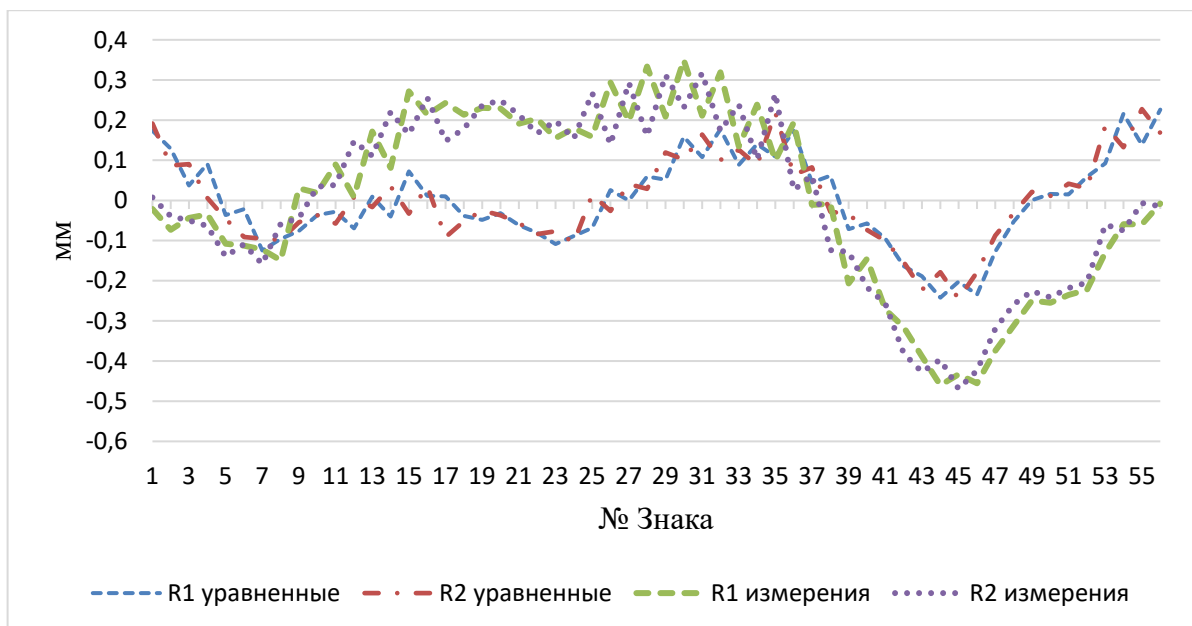


Рисунок 3.21 – График радиальных отклонений от проектных для варианта сети № 1, где R_1 уравненные – для знаков внешнего радиуса тоннеля после уравнивания; R_2 уравненные – для знаков внутреннего радиуса; R_1 измеренные – для знаков внешнего радиуса тоннеля до уравнивания; R_2 измеренные – для знаков внутреннего радиуса до уравнивания

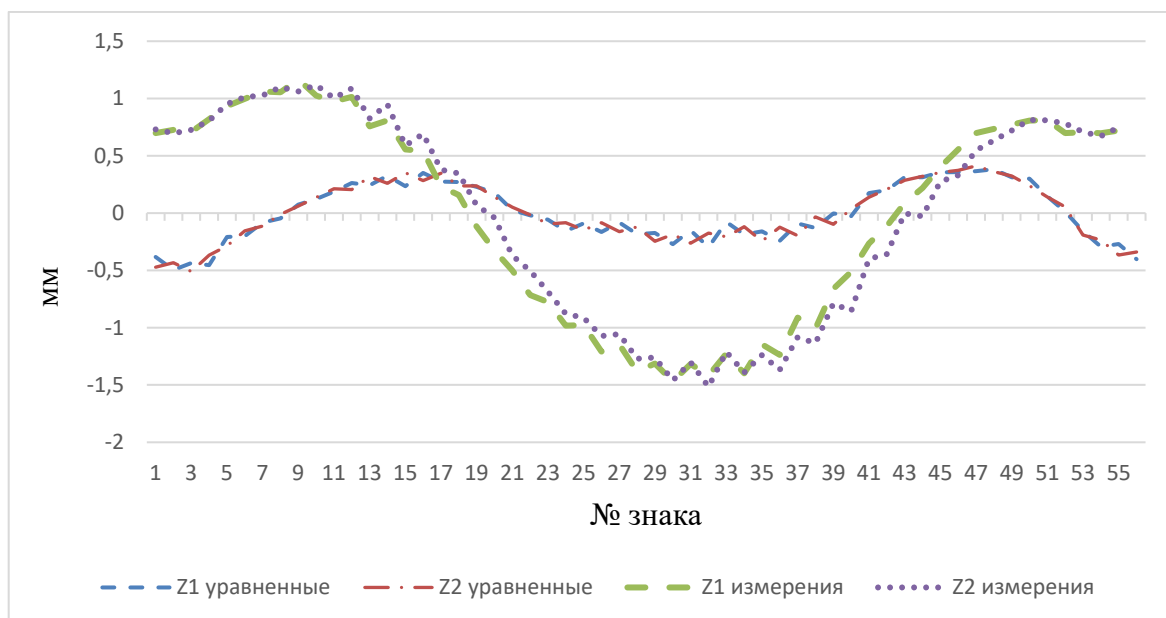


Рисунок 3.22 – График отклонений по Z координате от проектных для варианта сети № 1

Гармонический анализ полученных погрешностей измерений сети показал наибольшие амплитуды у первых трех гармоник. Особо стоит отметить отсутствие амплитуды первой гармоники погрешностей после уравнивания. На графиках для варианта сети № 1 представлены величины амплитуд погрешностей первых 20 гармоник для знаков сети варианта № 1 (рисунки 3.23–3.26) до и после уравнивания.

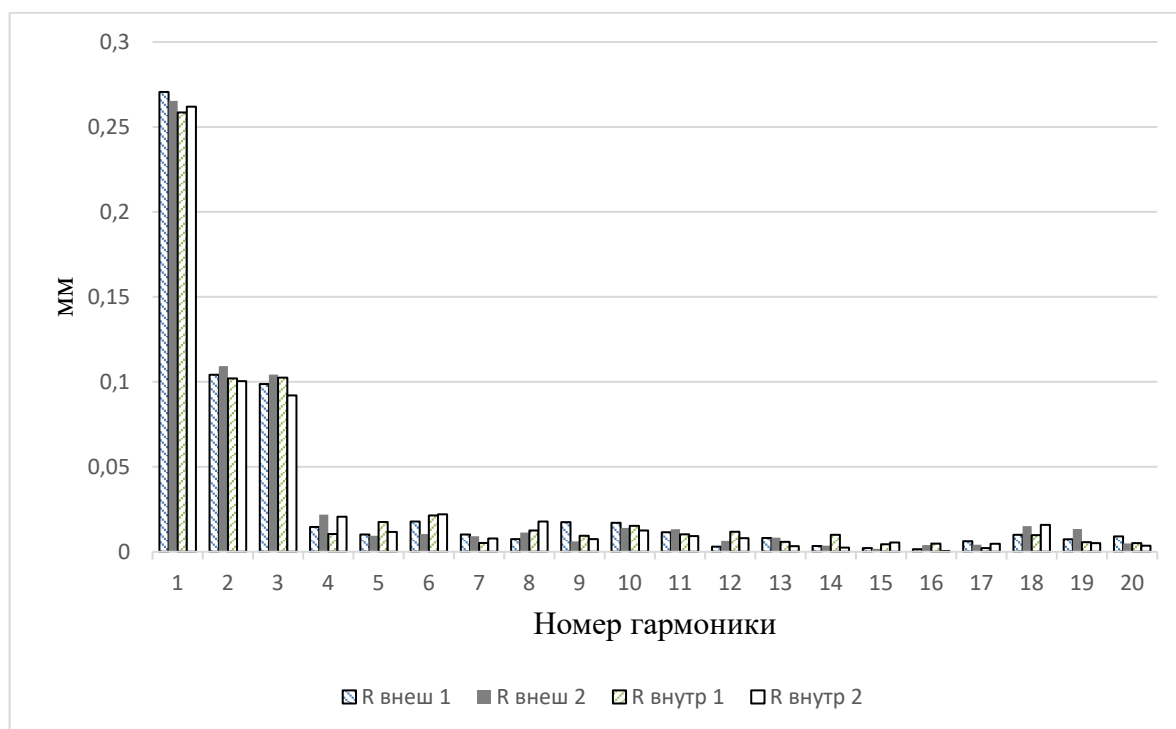


Рисунок 3.23 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в радиальном направлении до уравнивания, где $R_{\text{внеш 1}}$, $R_{\text{внеш 2}}$ – знаки, принадлежащие внешнему радиусу тоннеля с высотными отметками +0,5 и +2,5 м; $R_{\text{внутр 1}}$, $R_{\text{внутр 2}}$ – на внутреннем радиусе с высотными отметками +2,5 и +0,5 м

Схема геодезических измерений сети лазерным трекером для варианта № 2 представлена на рисунке 3.27.

Отклонения координат, полученных после уравнивания, от проектных значений для R и Z показаны на рисунке В.1 приложения В. СКП положения знака по результатам измерений одного цикла – 0,011 мм, отклонение от проектных координат – 0,21 мм.

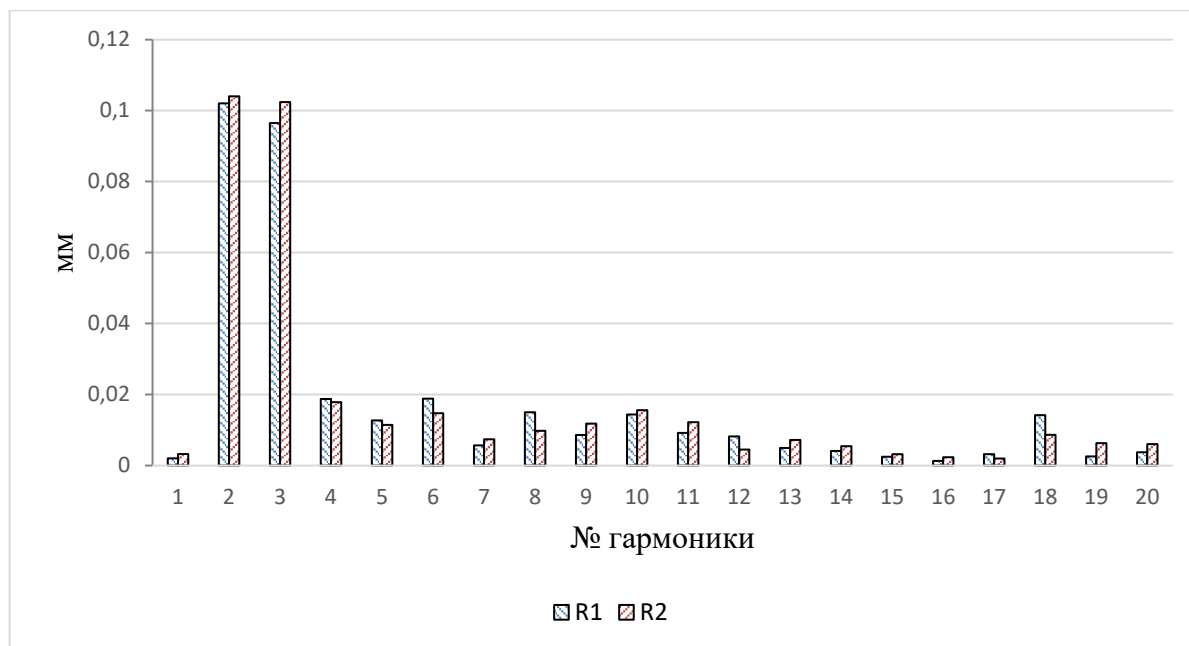


Рисунок 3.24 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в радиальном направлении после уравнивания, где R_1 – все знаки на внешнем радиусе, R_2 – на внутреннем радиусе

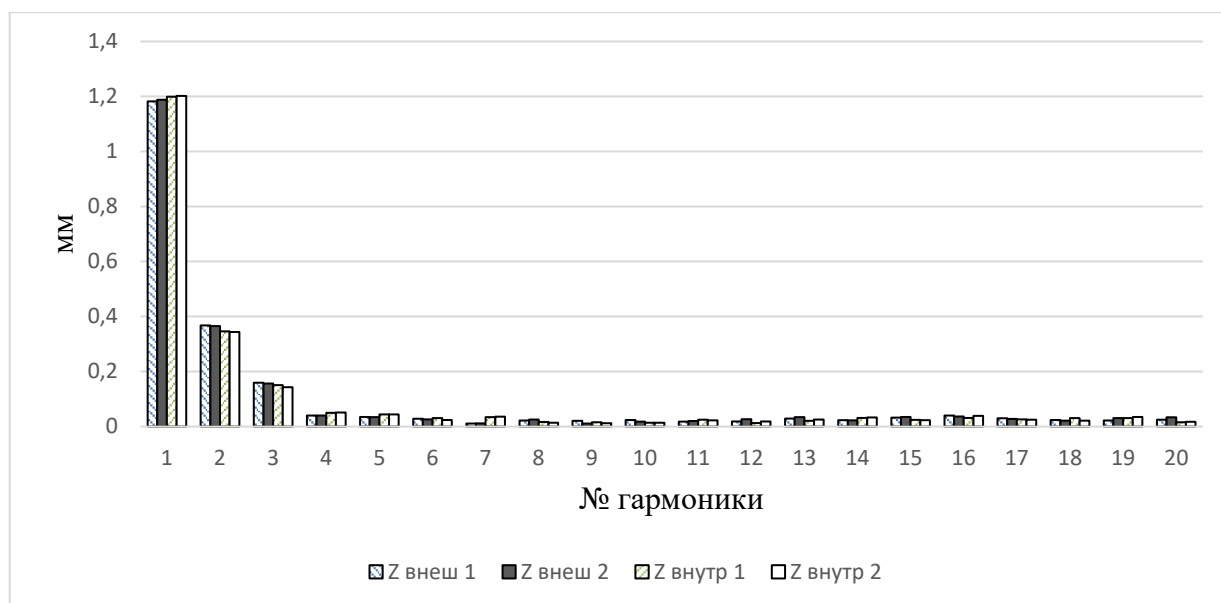


Рисунок 3.25 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в вертикальном направлении до уравнивания, где $Z_{\text{внеш } 1}$, $Z_{\text{внеш } 2}$ – знаки, принадлежащие внешнему радиусу тоннеля с высотными отметками +0,5 и +2,5 м; $Z_{\text{внутр } 1}$, $Z_{\text{внутр } 2}$ – на внутреннем радиусе с высотными отметками +2,5 и +0,5 м

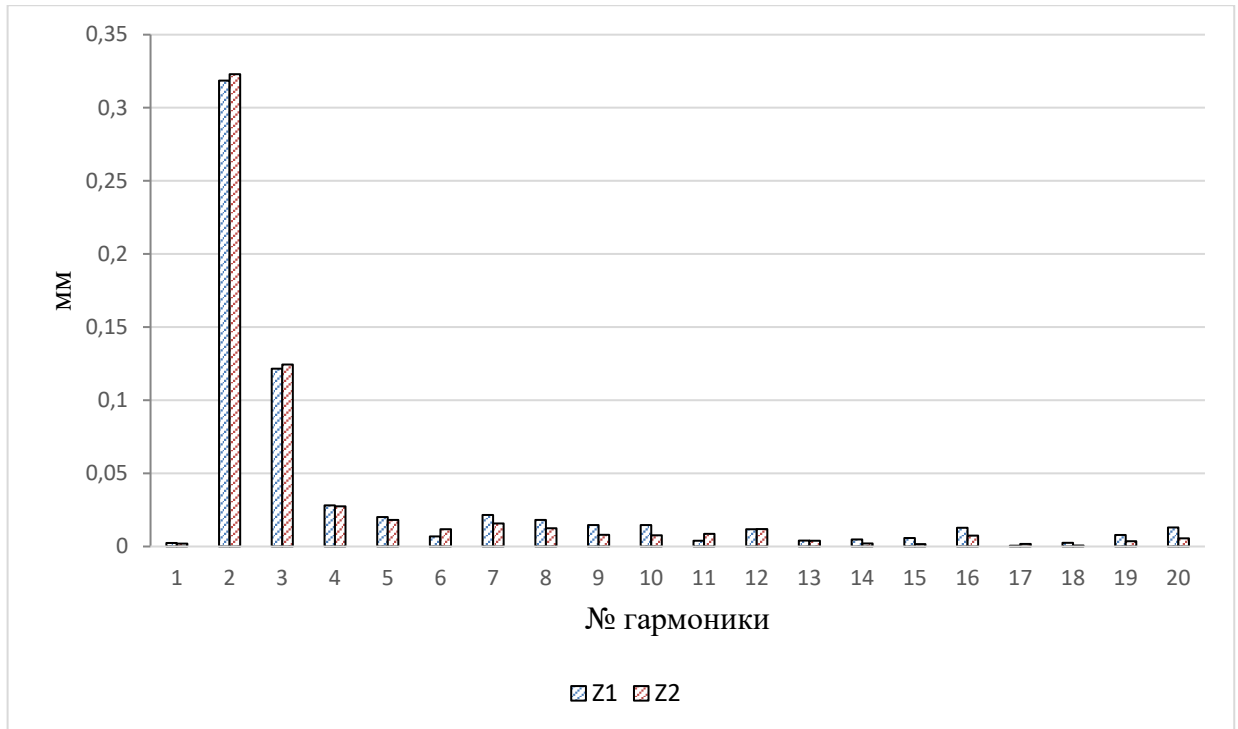


Рисунок 3.26 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в вертикальном направлении после уравнивания, где Z_1 – все знаки на внешнем радиусе, Z_2 – на внутреннем радиусе

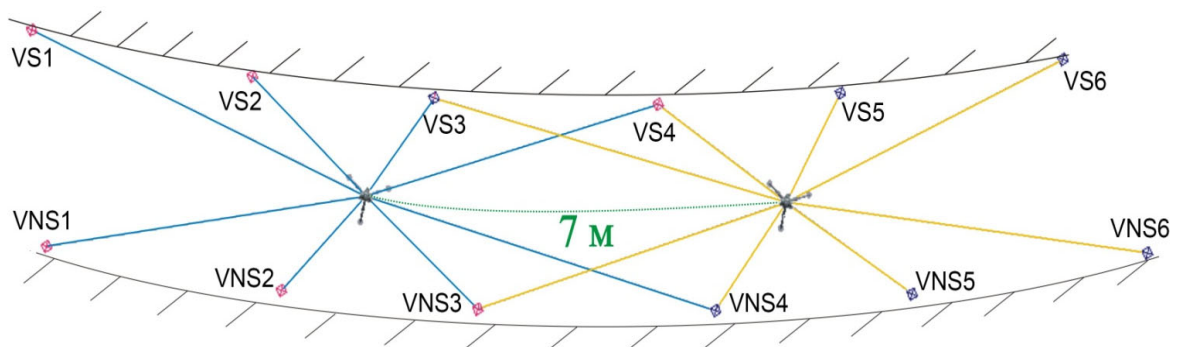


Рисунок 3.27 – Схема измерений проектируемой сети, вариант № 2

Спектральный состав погрешностей показал максимальные величины амплитуд первых трех гармоник для R и первых четырех для Z . Так как величины амплитуд для знаков внешнего и внутреннего радиуса и высотных отметок +0,5 и +2,5 м одинаковы, на графиках указана одна общая (рисунки 3.28, 3.29).



Рисунок 3.28 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для радиального направления варианта сети № 2



Рисунок 3.29 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для вертикального направления варианта сети № 2

Схема измерений сети лазерным трекером для варианта № 3 представлена на рисунке 3.30.

Отклонения координат, полученных после уравнивания, от проектных значений для R и Z показаны на рисунке В.1 приложения В. СКП положения знака по результатам измерений одного цикла – 0,005 мм, отклонение от проектных координат – 0,16 мм.

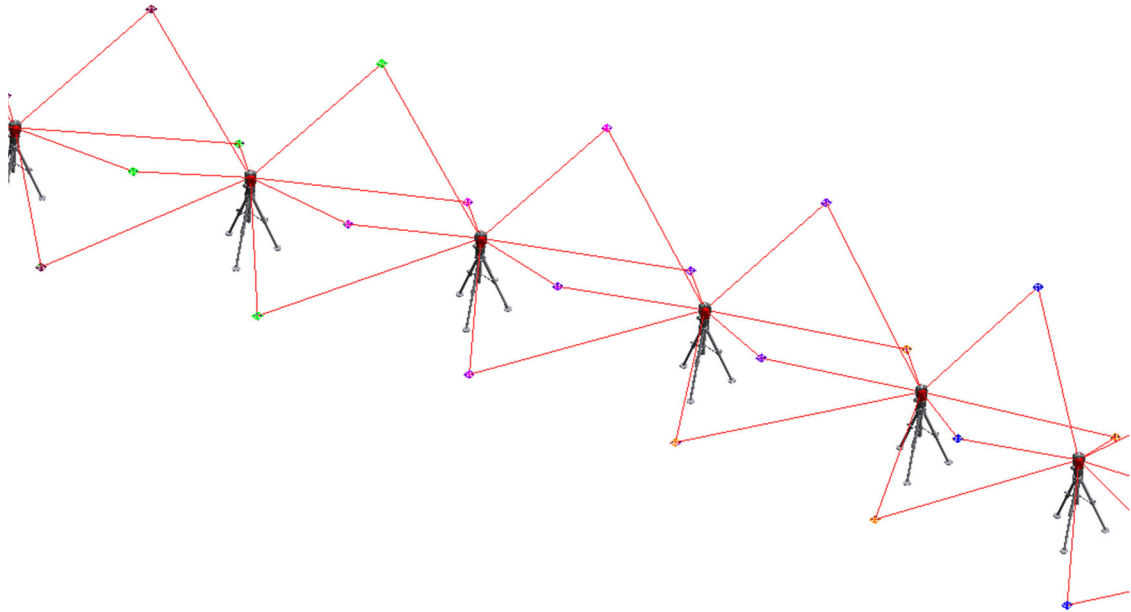


Рисунок 3.30 – Графическое отображение в Spatial Analyzer смоделированных измерений для варианта сети № 3 с шагом между станциями 3 м

Максимальные величины амплитуд для радиального направления включают первые три гармоники, как и в предыдущих вариантах (рисунок 3.31). Для $Z a_k \geq 0,05$ мм, где $k=1, 2, 4, 5$ (рисунок 3.32).

Гармонический анализ показал, что при увеличении расстояний между знаками величина амплитуды первой гармоники уменьшается для R . Для Z наблюдается обратный эффект, однако, в варианте сети № 3 амплитуда гармоники $k = 5$ проявляет себя на уровне величины 0,05 мм. Таким образом, оптимальным вариантом для выбора сети является вариант из комбинации расстояний между знаками сети из варианта № 1 и шагом между станциями как в варианте № 2.

Погрешность определения координат знаков сети по направлениям R и Z для трех вариантов сети является удовлетворительной. Это связано с отсутствием требования на взаимное положение магнитных элементов, находящихся на диаметрально противоположных сторонах периметра сети. Из таблицы 3.3 видно, что СКП положения знаков для контролируемых направлений минимальны для варианта № 3, однако это самый неоптимальный с точки зрения производства геодезических работ вариант из-за большого количества станций лазерного трекера.



Рисунок 3.31 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для радиального направления варианта сети № 3

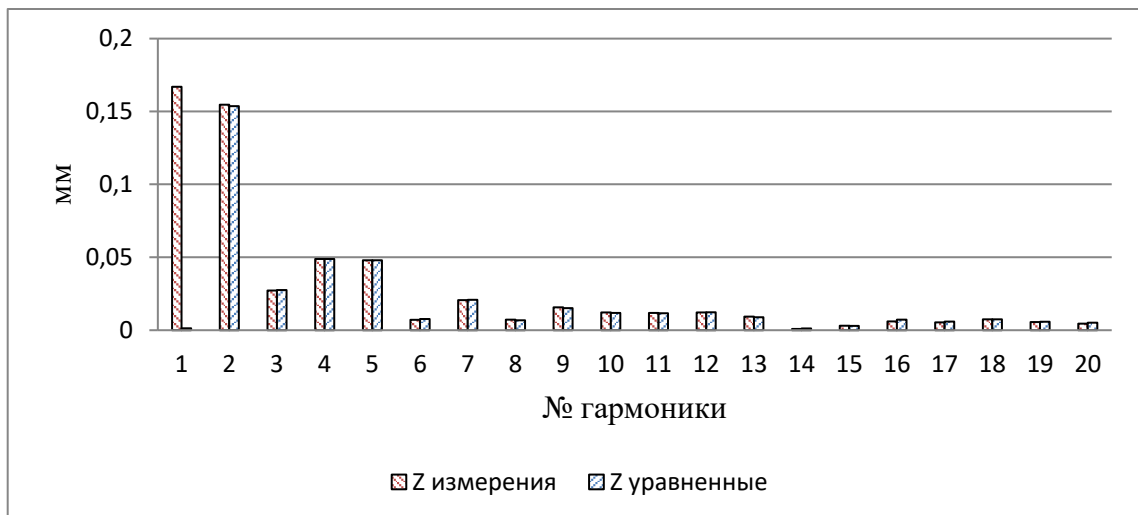


Рисунок 3.31 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для вертикального направления варианта сети № 3

Таблица 3.3

Вариант построения сети	Средние квадратические погрешности, мм	
	m_R	m_Z
1	0,11	0,24
2	0,16	0,12
3	0,09	0,12
Предлагаемый вариант построения СГС	0,11	0,12

3.4 Выводы и рекомендации по третьему разделу

На основании анализа реализованных проектов современных ускорительных комплексов (в период после 2010 г.) разработана методика геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования. Разработан алгоритм расчета каталога проектных координат знаков сети для моделирования геодезических изменений в программном продукте Spatial Analyzer.

Полученные в результате выполненных исследований значения полуосей эллипсоидов погрешностей являются математическим основанием настройки модуля Measurement Simulation для моделирования геодезических измерений в программном продукте Spatial Analyzer (определены коэффициенты: Error distance measurement – 0,0003 мм; parts per million – 0,7).

Проведены исследования результатов уравнивания двух программных продуктов, используемых в геодезических работах на ускорительных комплексах, – Spatial Analyzer и PANDA. В результате исследований показана эффективность использования Spatial Analyzer для моделирования измерений и уравнивания полученных результатов.

По разработанной схеме и алгоритму произведены расчеты трех вариантов сети для кольцевого тоннеля со средним периметром 282,7 м. СКП координат знаков лежит в пределах 0,1–0,25 мм, что является удовлетворительным. Оптимальными выбраны варианты № 1 и 2, так как в них величины погрешностей амплитуд первых трех гармоник являются максимальными. Исходя из критерия минимального количества знаков и станций, вариант сети № 1 является наиболее предпочтительным. При требованиях на установку магнитных элементов $m_{R,Z} = 0,05$ мм оптимальным вариантом для монтажа технологического оборудования УНК является вариант комбинации расстояний между знаками сети из варианта № 1 и шагом между станциями варианта № 2.

4 РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ

4.1 Основные сведения об источнике синхротронного излучения СКИФ

Источник синхротронного излучения СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов) является первым реализуемым проектом центров коллективного пользования (ЦКП) – объектов мультидисциплинарной исследовательской инфраструктуры, обеспечивающих проведение научных исследований в различных областях науки и техники от материаловедения до медицины. Эффективный срок работы такого центра 25–30 лет. Расположение ЦКП СКИФ планируется недалеко от Государственного центра вирусологии и биотехнологий «Вектор» в поселке Кольцово Новосибирской области.

Проектируемый ускоритель будет состоять из линейного ускорителя электронов на 200 мегаэлектронвольт (МэВ) длиной 25 м; накопительного кольца бустера с максимальной энергией 3 гигаэлектронвольт (ГэВ) периметром 158 м; транспортных каналов ввода-вывода пучка; основного кольца синхротрона с энергией 3 ГэВ и периметром 476 м; 6 пользовательских станций с каналами вывода СИ (1-я очередь до 2024 г.) (рисунок. 4.1).

Линейный ускоритель предназначен для формирования последовательности пучков электронов требуемой интенсивности и модуляции. Проектирование линака базируется на основе разработок инжекционного комплекса ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН.

Бустер источника СИ СКИФ будет аналогом бустера NSLS-II (Брукхевенская Национальная Лаборатория США) [114, 115].

Основное кольцо состоит из 18 симметричных ускоряющих секций (суперпериодов). Каждый суперпериод состоит из «ячеек» – гирдерных модулей с установленными на них элементами оптической структуры ускорителя. В одном суперпериоде 7 «ячеек» – последовательно расположенный набор электромагнитов оптической структуры ускорителя для фокусировки пучка частиц и вывода СИ.

В составе суперпериода: 1 «ячейка» вывода жесткого рентгена; 4 базовые «ячейки»; 2 – без дисперсионной «ячейки». Все элементы суперпериода располагаются на 5 гирдерах (рисунок 4.2).

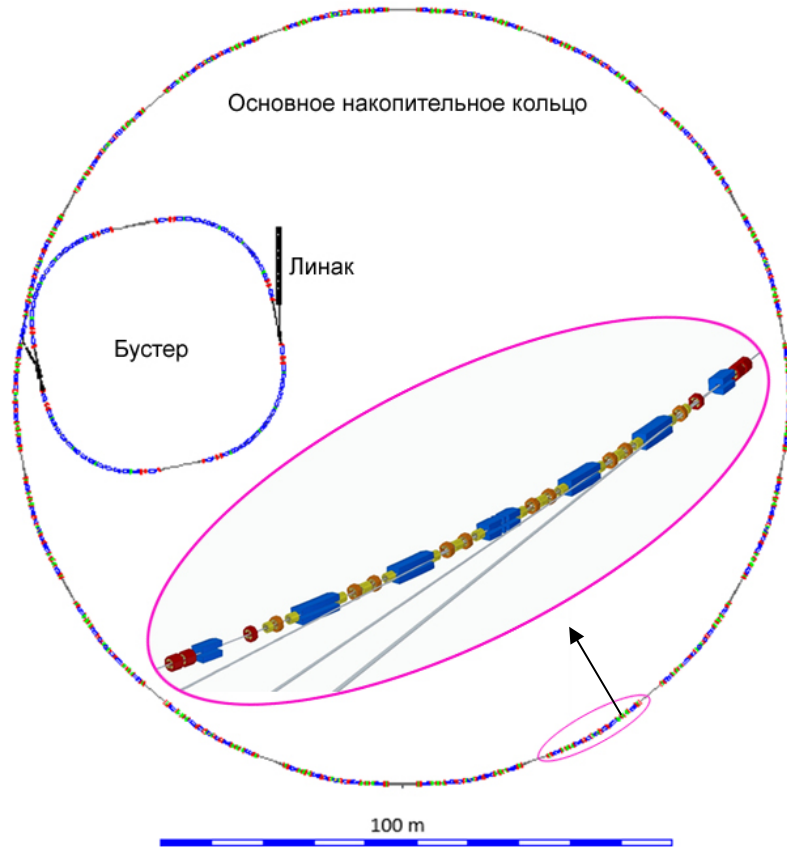


Рисунок 4.1 – Концептуальная схема основных компонентов источника СИ СКИФ с изображением одного суперпериода магнитной структуры основного кольца

Количество элементов оптической структуры основного кольца: дипольных электромагнитов – 144; квадрупольных линз – 256; секступольных линз – 256. Количество выводов синхротронного излучения 30, 14 – из прямолинейных промежутков, 16 – из магнитных элементов.

Физиками ИЯФ СО РАН были проведены расчеты чувствительности пучка частиц, двигающихся по замкнутой кольцевой орбите в основном накопительном кольце, при смещении элементов оптической структуры от проектного значения

(ошибки выставки элементов). Для монтажа магнитной структуры источника четвертого поколения СКИФ проектные допуски приведены в таблице 4.1.

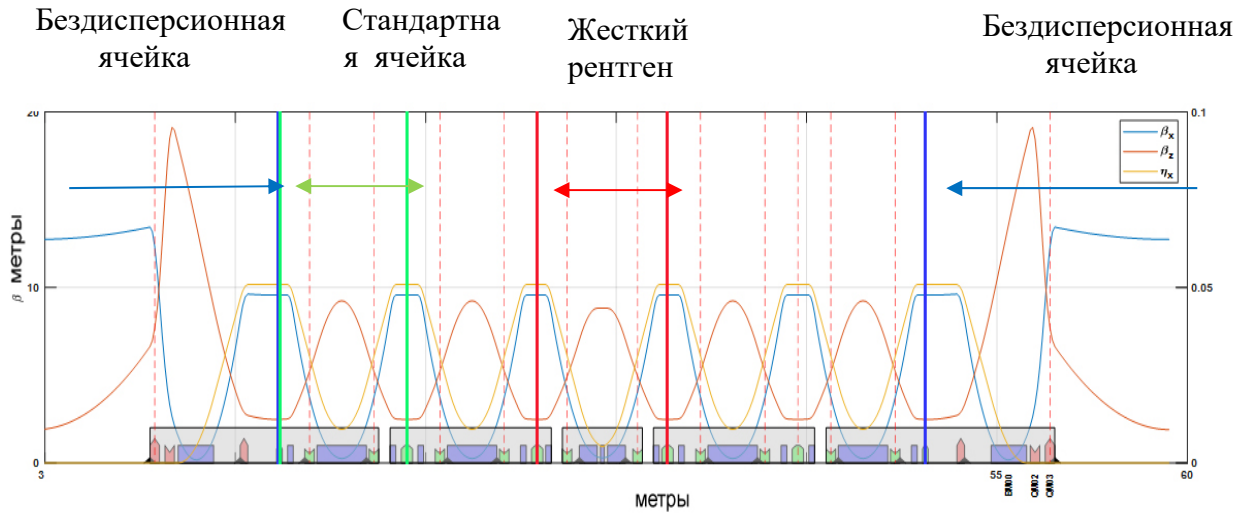


Рисунок 4.2 – Суперпериод с указанием оптических функций

Таблица 4.1

Название технологического оборудования	Допуск, мм
Квадрупольные линзы	0,03–0,05
Гирдер	0,07

Частота бетатронных колебаний 17,6. С учетом количества суперпериодов 16, можно предположить, что максимальные амплитуды возмущения будут принадлежать гармоникам, кратным 16–18.

Точность установки в проектное положение всех элементов позволяет провести частицы из бустерного синхротрона и захватить их оптической структурой основного кольца. После захвата начинает работать алгоритм коррекции пучка. Результаты расчета работы алгоритма с искаженной орбитой приведены на рисунке 4.3.

Возмущения, вызванные погрешностями установки в проектное положение элементов и гирдеров в пределах определенных допусков, влияют на положение пучка на первых 200 м после инъекции в основное кольцо. Далее орбита стабилизируется коррекциями оптической структуры.

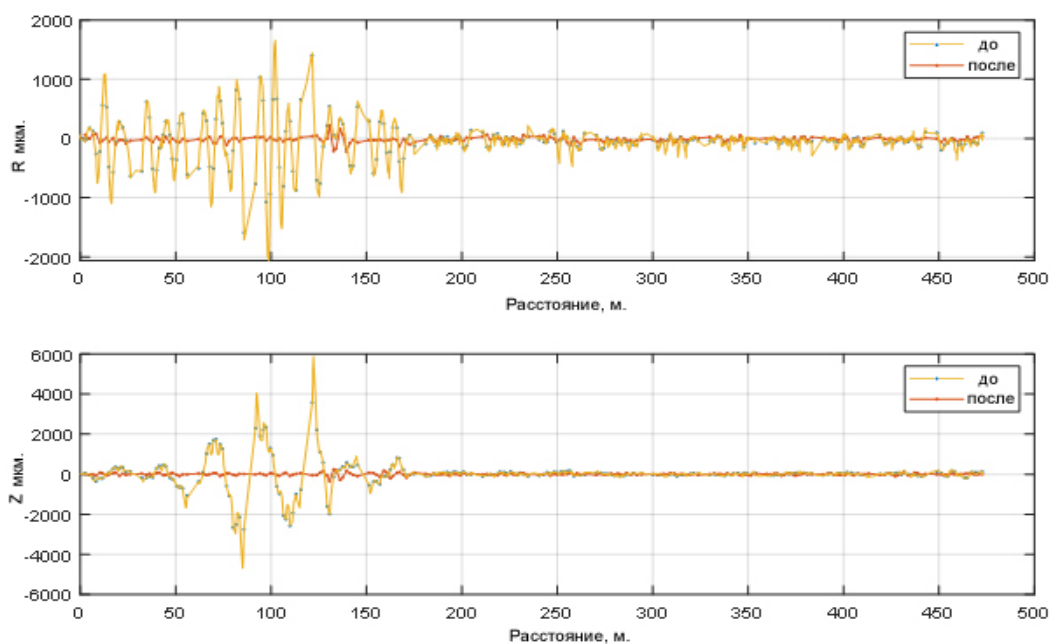


Рисунок 4.3 – Расчет эффективности работы алгоритма коррекции орбиты после захвата пучка частиц в основном кольце в радиальном и высотном направлениях

4.2 Реализация методики геодезического обеспечения для источника СИ четвертого поколения СКИФ

На основании полученных данных, рассмотренных в 4.1, и полученной САД-модели суперпериода были произведены расчеты по разработанной автором методике для специальной геодезической сети источника СИ СКИФ. Так как проект здания на момент проведения исследований отсутствовал, предложенный вариант сети будет дорабатываться в соответствии с разработкой проекта УНК.

Габариты тоннеля основного кольца источника СИ СКИФ взяты из расчета удобства расположения оборудования, станций лазерного трекера и геодезических знаков в нем. Внешний радиус стены тоннеля 76,78 м, внутренний – 73,28 м. Через три точки заданного радиуса суперпериода была построена окружность (две крайние точки входа и выхода, принадлежащие прямолинейным промежуткам, и центральная точка суперпериода). Эта окружность является орбитой пучка в первом приближении. Относительно нее выбирается положение станций лазерного трекера.

Параметры проектных данных специальной геодезической сети СКИФ указаны в таблице 4.2. Для высотных отметок знаков, как и во всех рассмотренных ранее вариантах сетей, предлагается асимметричное расположение на стенах тоннеля. Последовательно расположенные знаки будут иметь отметки -1 и +1 м относительно плоскости орбиты. Всего количество знаков для предложенного варианта сети составило 205 шт.

Таблица 4.2

Количество знаков в сети	Центральные углы (°)		Количество станций лазерного трекера	L_2 (м)	Средние квадратические погрешности (мм)	
	Внешний радиус	Внутренний радиус			m_R	m_Z
205	3,43	3,59	40	12	0,32	0,13

На рисунке 4.4 показана схема измерений при установке в проектное положение и исполнительной съемке гирдеров с магнитными элементами.

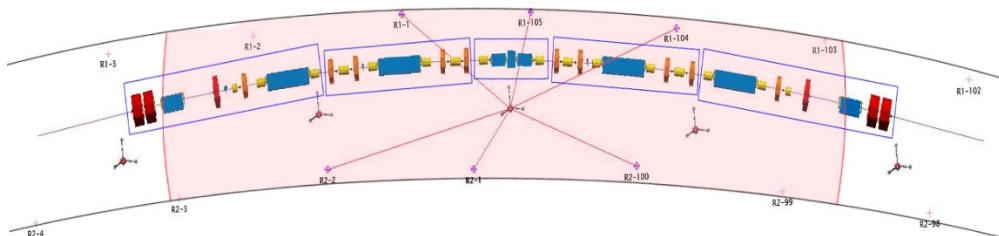


Рисунок 4.4 – Схема измерений со станции лазерного трекера для монтажа гирдерных модулей источника СИ СКИФ

Таким образом, выбранный радиус измерений со станции позволяет контролировать положение элементов практически всего суперпериода с одной станции. Для качественной оценки рекомендуется производить измерения с нескольких станций лазерного трекера. В предложенной схеме пять станций лазерного трекера устанавливаются между гирдерными модулями суперпериода. Такое избыточное количество станций необходимо только на этапе монтажа оборудования, в процессе эксплуатации возможно использовать схему измерений геодезической сети ускорителя.

Для повышения производительности труда расстояние между станциями лазерного трекера предлагается выбрать 12 м. При этом относительно большая длина визирного луча увеличит погрешность измерений со станции на 14 % из-за включения в зоны перекрытий удаленных знаков. Однако это влияет на СКП определения координат знаков по всему кольцу, что показано в 1.5 и 3.3, и не влияет на орбиту пучка частиц. Уменьшение количества станций с 51 для $L_2 = 10,6$ м до 40 для $L_2 = 12$ м существенно сокращает временные затраты на измерения сети.

Схема измерений геодезической сети показана на рисунке 4.5. Измерения с трех станций лазерного трекера перекрывают длину одного суперпериода.

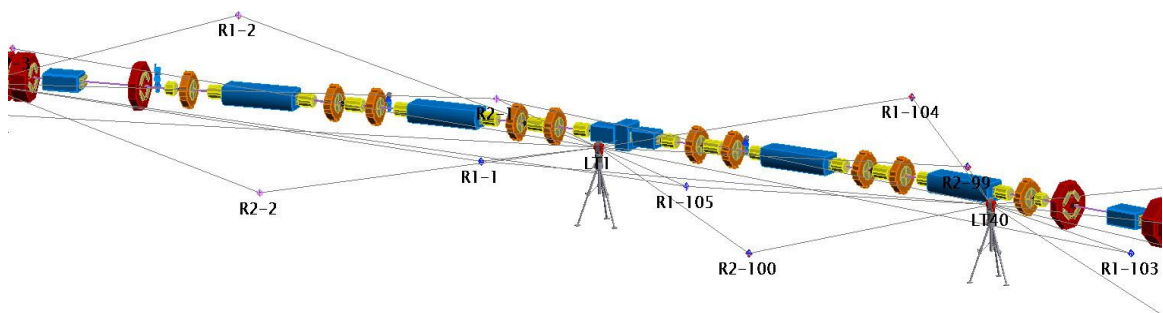


Рисунок 4.5 – Схема измерений геодезической сети СКИФ основного кольца

Для учета влияния внешних условий в тоннеле ускорителя на измерения все результаты умножаются на 3. Отклонения от проектных координат по радиальному направлению – 0,32 мм, по вертикальному – 0,13 мм (см. таблицу 4.2).

Гармонический анализ результатов приведен на рисунках 4.6, 4.7. СКП ориентирования станции для проведения работ установки в проектное значение гирдерных модулей по 6 знакам сети 0,015 мм.

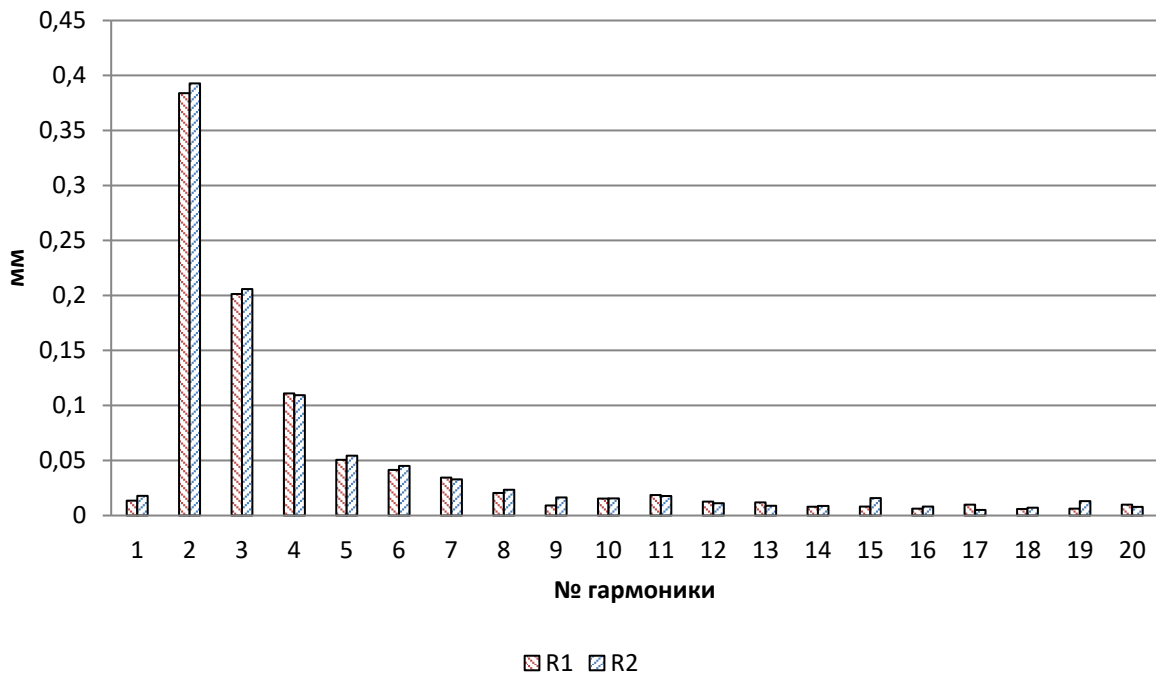


Рисунок 4.6 – График спектральной чувствительности предложенного варианта сети источника СИ СКИФ для радиального направления, где R_1 – знаки, принадлежащие внешнему радиусу; R_2 – знаки, принадлежащие внутреннему радиусу

При наличии всех необходимых проектных данных тоннеля и магнитной структуры ускорителя появится возможность определить зону расположения знаков на внешней стене тоннеля, согласно рисунку 3.4.

На основании выполненных исследований по уравниванию измерений в специальных геодезических сетях (реальных, для ВЭПП-4М и на спроектированных) в циклических УНК показано, что результаты измерений должны включать в себя данные высокоточного нивелирования короткими лучами. Для этого необходимо разработать измерительную систему, позволяющую устанавливать на один знак

как отражатель лазерного трекера, так и рейку в соответствии с требованиями высокоточного нивелирования [6, 19, 36, 44, 68, 69]. При этом центр отражателя и ноль нивелирной рейки должны иметь наименьшую разницу (порядка 0,02 мм).

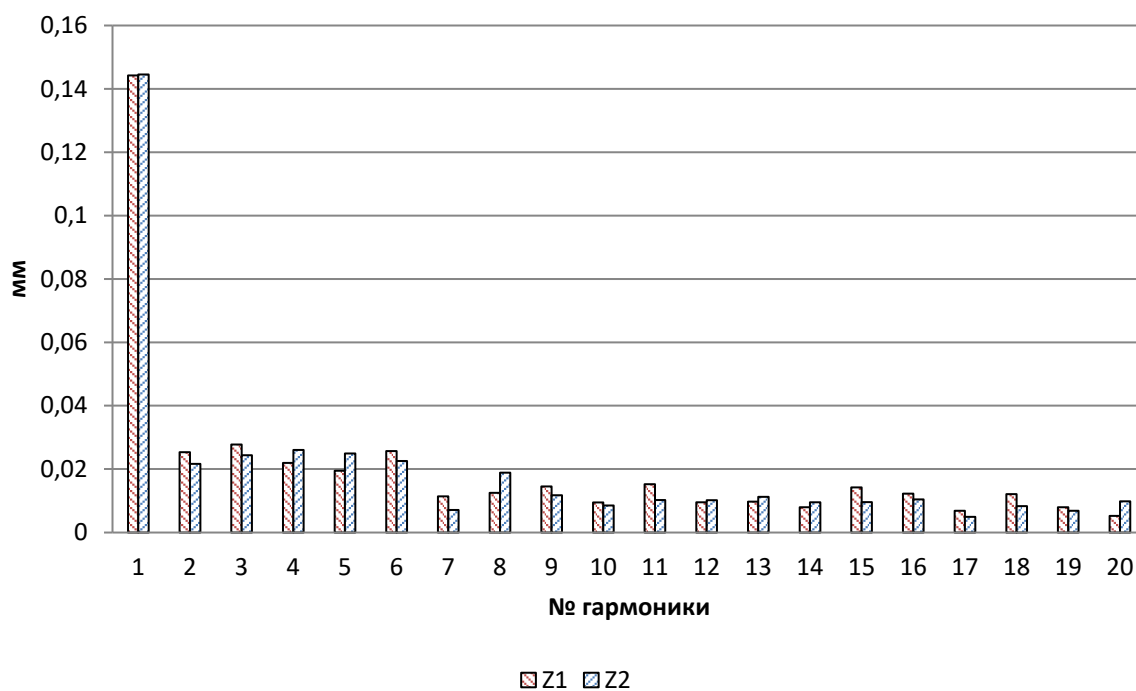


Рисунок 4.7 – График спектральной чувствительности предложенного варианта сети источника СИ СКИФ для вертикального направления, где Z_1 – знаки, принадлежащие внешнему радиусу; Z_2 – знаки, принадлежащие внутреннему радиусу

На основе проведенного спектрального анализа предложенного варианта сети было установлено, что урвненные координаты пунктов СГС позволяют устанавливать технологическое оборудование УНК в проектное положение в соответствии с заданными допусками.

4.3 Выводы по четвертому разделу

На основе алгоритма разработанной автором методики проектирования геодезических сетей были проведены расчеты для проекта источника СИ четвертого поколения СКИФ, реализуемого в Новосибирской области.

На основании исходных данных, имеющихся на февраль-март 2020 г., по магнитной структуре ускорителя вычислен каталог проектных координат знаков сети. Плотность знаков обеспечивает позиционирование лазерного трекера в любом месте тоннеля основного кольца с погрешностью 0,015 мм. Количество знаков, станций лазерного трекера, схема измерений сети и установки оборудования ускорителя позволяет обеспечивать производство геодезических работ в тоннеле с требуемой точностью. Количество знаков сети в предложенном варианте – 205. Количество станций – 40.

Отклонения от проектных значений по радиальному направлению – 0,32 мм, по вертикальному – 0,13 мм (по результатам 5 циклов). Максимальная величина амплитуды для радиального направления – 0,39 мм, для вертикального – 0,14 мм. Выделенными являются номера гармоник $k = 2, 3, 4$ для R и $k = 1$ для Z .

Показано, что геодезических сетей циклических ускорителей актуальным остается производство высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами. Для корректного совместного уравнивания с данными лазерных трекеров необходимо разработать специальный геодезический знак.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных научных исследований цель диссертационной работы достигнута. Получены следующие основные результаты:

– выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта создания УНК, установлено, что для геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования каждого проекта применялись свои уникальные технологические решения и отсутствует единая методика создания специальной геодезической сети с применением лазерных трекеров;

– в результате выполненных исследований влияния расстояний на параметры эллипсоидов погрешностей при производстве геодезических измерений лазерными трекерами API Radian и Leica 400-й серии определены коэффициенты, необходимые для настройки модуля проектирования специальной геодезической сети (Measurement Simulation) в программном продукте Spatial Analyzer;

– разработан алгоритм вычисления оптимальных параметров (углов и расстояний от инструмента до отражателя) при работе с лазерными трекерами с учетом заданного допуска и радиуса проектной кольцевой оси, позволяющий повысить производительность труда при установке технологического оборудования и обеспечить достижение необходимой точности;

– разработанная методика геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения позволяет получить проектные координаты геодезических знаков специальной сети, произвести моделирование геодезических измерений в программном продукте Spatial Analyzer и получить оптимальный вариант СГС;

– проведено экспериментальное исследование разработанной методики геодезического обеспечения для установки элементов магнитной структуры источника синхротронного излучения 4-го поколения СКИФ в соответствии с требованиями ($m_{\text{СГС}} = 0,07$ мм) и проектным радиусом ($R = 476$ м), в результате разработан проект создания специальной геодезической сети с оптимальным количеством определяемых пунктов и станций лазерного трекера.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при создании уникального технологического оборудования российских и зарубежных ускорительных комплексов.

Перспективы дальнейшего диссертационного исследования в этом направлении состоят в совершенствовании и исследовании предложенной методики проектирования специальных геодезических сетей для обеспечения строительства, монтажа и пространственного мониторинга технологического оборудования отечественных и зарубежных коллайдеров и источников синхронного излучения последующих поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков, В. Д. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам [Текст] / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук, В. Е. Новак. – М. : Недра, 1980. – 781 с.
2. Брынь, М. Я. Проектирование геометрических параметров наземного лазерного сканирования при контроле деформаций зданий и сооружений в условиях плотной застройки [Текст] / М. Я. Брынь, Д. А. Афонин, Е. Г. Толстов // Геодезия и картография. – 2012. – № 2. – С. 2–7.
3. Власенко, Е. П. Особенности ориентирования подземных геодезических сетей методом двух шахт [Текст] / Е. П. Власенко, Хамид Фармарз Пур // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – № 1. – С. 39–43.
4. Влияние электромагнитных полей на инженерно-геодезические работы [Текст] / Г. А. Уставич, Я. Г. Пошивайло, Е. Л. Соболева, М. С. Калинина // Геодезия и картография. – 2005. – № 11. – С. 28–30.
5. Высокоточные инженерно-геодезические работы по созданию опорной геодезической сети ускорителя [Текст] / М. А. Боков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский : метод. указания по выполнению лаб. работ. – Новосибирск : СГГА, 2007. – 50 с.
6. Ганьшин, В. Н. Геодезические методы измерений вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов [Текст] / В. Н. Ганьшин, А. Ф. Стороженко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1991. – 190 с.
7. Геодезические методы диагностики дорог [Текст] / В. В. Щербаков, В. Н. Васёха, Д. А. Неверов, М. Ю. Буланов // ГеоСибирь-2007: сб. материалов междунар. науч. конгр.– Новосибирск.– 2007.– Т. 1, ч. 1.– С. 131–139.
8. Геодезический мониторинг вертикальных деформаций тоннелей ускорительных комплексов ИЯФ СО РАН [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013 : IX Междунар. Науч. конгр. : 15–26 апр. 2013 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов. – Новосибирск : СГГА, 2013. – Т. 1, ч. 1. – С. 128–132.

9. Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 13–16.
10. Геодезическое обеспечение эксплуатации промышленных предприятий [Текст] / В. Б. Жарников, Б. Н. Дьяков, Б. Н. Жуков и др. – М. : Недра, 1992. – 160 с.
11. Горелов, В. А. Принцип преемственности и его роль при построении геодезических сетей на поверхности и в тоннеле УНК [Текст] / В. А. Горелов, Г. В. Глухов, Е. Д. Лавриненко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2002. – № 3. – С. 15–21.
12. Горелов, В. А. Создание планового геодезического обоснования при строительстве УНК [Текст] / В. А. Горелов, Г. В. Глухов, Е. Д. Лавриненко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2002. – № 3. – С. 3–14.
13. ГОСТ 21779-82 (СТ СЭВ 2681-80). Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски [Текст]. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 22 с.
14. ГОСТ 2484–2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2014.
15. ГОСТ 8.401–80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования [Текст]. – М. : Изд-во стандартов, 2010. – 12 с.
16. ГОСТ Р 55024-2012 Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования [Текст]: Национальный стандарт Российской Федерации. – М. : Стандартинформ, 2014.
17. Гуляев, Ю. П. Прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным [Текст] / Ю. П. Гуляев // Геодезия и картография. – 1983. – № 12. – С. 17–21.
18. Единство и различие конструктивных решений защитных оболочек АЭС с реактором ВВЭР [Текст] / Ю. И. Пимшин, Е. Б. Ключин, В. Н. Медведев, О. А. Губеладзе // Геодезия и картография. – 2017. – № 1. – С. 22–27.

19. Жарников, В. Б. О классах точности нивелирования для контроля деформаций [Текст] / В. Б. Жарников, Б. Н. Жуков // Геодезия и картография. – 1990. – № 9. – С. 22–26.

20. Жуков, Б. Н. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов [Текст] : учеб. пособие / Б. Н. Жуков, А. П. Карпик. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 148 с.

21. Жуков, Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации [Текст] / Б. Н. Жуков. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 376 с.

22. Иванов, В. Г. Об одном из главных источников ошибок точного и высокоточного нивелирования [Текст] / В. Г. Иванов // Геодезия и картография. – 1998. – № 4. – С. 21–26.

23. Инженерная геодезия [Текст] : учеб. для вузов / Е. Б. Ключин, М. И. Киселев, Д. Ш. Михелев, В. Д. Фельдман; под ред. Д. Ш. Михелева. – 4-е изд., испр. – М. : Академия, 2004. – 480 с.

24. Инженерная геодезия. Геодезические сети [Текст] : учеб. пособие / В. С. Ермаков, Е. Б. Михаленко, Н. Н. Загрядская, Н. Д. Беляев, Ф. Н. Духовской. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. – 40 с.

25. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов [Текст]. – М. : ЦНИИ-ГАиК, 2004. – 226 с.

26. Исследование точностных характеристик внутреннего электронного уровня API Laser Tracker 3 [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 13–16.

27. Исследование точностных характеристик дальномеров API LASER TRAKER 3 [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // ГЕО-Сибирь-2011: сб. материалов. – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 9–12.

28. Карлсон, А. А. О качестве высокоточного нивелирования короткими лучами [Текст] / А. А. Карлсон // Геодезия и картография. – 1986. – № 4. – С. 45–49.
29. Карпик, А. П. Вычисление вероятнейшего положения оси тоннеля на круговой кривой [Текст] / А. П. Карпик // Совершенствование методов инженерно-геодезических работ : межвуз. сб. – Новосибирск : НИИГАиК. – 1988. – Вып. 37. – С. 67–73.
30. Карпик, А. П. Геодезическое обеспечение изысканий, строительства и мониторинга мостовых сооружений [Текст] : учеб. пособие / А. П. Карпик, П. П. Мурзинцев, В. А. Падве. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 222 с.
31. Карпик, А. П. Исследование и анализ точности специальных инженерно-геодезических сетей методом математического моделирования [Текст] : метод. указания / А. П. Карпик, И. Н. Чешева. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 32 с.
32. Карпик, А. П. Некоторые проблемы геодезического обеспечения тоннеля при скоростной проходке [Текст] / А. П. Карпик; Новосиб. ин-т инж. геодезии, аэрофотосъемки и картографии. – Деп. в ВОНТИ ЦНИИГАиК 27.05.83, № 98, гд-Д-83. – Новосибирск, 1983.
33. Коллайдеры и детекторы ИЯФ [Текст] / А. Н. Скринский, П. В. Логачев, Г. Н. Кулипанов и др. – Новосибирск : ИЯФ СО РАН, 2018. – 426 с.
34. Колмогоров, В. Г. О возможности изучения деформационного состояния земной поверхности по результатам повторного высокоточного нивелирования [Текст] / В. Г. Колмогоров, Г. Г. Асташенков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 16–17.
35. Колмогоров, В. Г. Оценка пространственно-временных характеристик современной геодинамики Сибири [Текст] / В. Г. Колмогоров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 33–35.
36. Кочетов, Ф. Г. Нивелиры с компенсаторами [Текст] / Ф. Г. Кочетов. – М. : Недра, 1985. – 148 с.
37. Лебедев, А. Н. Теория циклических ускорителей [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Лебедев. – М., 1962.

38. Левашов, Ю. И. Критерии и технология прецизионной установки магнитов ВЭПП-4м методом сглаживания [Текст] : автореф. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 01.04.20 / Левашов Юрий Иванович. – Новосибирск, 1999. – 17 с.
39. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов [Текст] / Ч. Лоусон, Р. Хенсон ; пер. с англ. – М. : Наука, 1986. – 232 с.
40. Лошков, С. А. Геодезическое обеспечение строительства технологических тоннелей и монтажа блоков ускорительно-накопительных комплексов [Текст] : обзор. инфор. / С. А. Лошков, Л. Н. Витюк. – М. : ЦНИИГАиК ГУГК СССР, 1988. – 68 с.
41. Мазуров, Б. Т. Анализ геодезических измерений с учетом динамики объектов мониторинга [Текст] / Б. Т. Мазуров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 18–21.
42. Маркузе, Ю. И. Основы уравнительных вычислений [Текст] : учеб. пособие для геодез. спец. вузов / Ю. И. Маркузе. – М. : Недра, 1990. – 239 с.
43. Маркузе, Ю. И. Теория математической обработки геодезических измерений [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. И. Маркузе, В. В. Голубев ; под общ. ред. Ю. И. Маркузе. – М. : Академический Проект Альма Матер, 2010. – 247 с.
44. Мещерский, И. Н. Об ошибках высокоточного нивелирования [Текст] / И. Н. Мещерский // Геодезия и картография. – 1987. – № 7. – С. 48–52.
45. Наземное лазерное сканирование [Текст] : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.
46. Неволин, А. Г. Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 13–19.
47. Неволин, А. Г. К вопросу о влиянии ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров технологического оборудования [Текст] /

А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 16–27.

48. Нестерёнок, В. Ф. О нормировании точности геометрического нивелирования для измерения деформаций [Текст] / В. Ф. Нестерёнок // Геодезия и картография. – 1992. – № 3. – С. 16–18.

49. Николаев, С. А. Определение периода стабилизации осадок инженерных сооружений по данным геодезических наблюдений [Текст] / С. А. Николаев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 1978. – № 4. – С. 41–45.

50. Николаев, С. А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений [Текст] / С. А. Николаев. – М. : Недра, 1983. – 110 с.

51. О выборе местоположения станций лазерного трекера для установки технологического оборудования [Текст] / Л. Е. Сердаков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский // Геодезия и картография. – 2019. – № 11. – С. 22–25.

52. О геодезическом сопровождении BOOSTER NSLS-II Брукхейвенской национальной лаборатории министерства энергетики США [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012 : VIII Междунар. науч. конгр. : 10–12 апр. 2012г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия», сб. материалов в 3 т. – Новосибирск : СГГА, 2012. – Т. 1. – С. 183–188.

53. О нахождении устойчивой группы знаков при обработке повторных измерений в свободных сетях [Текст] / М. А. Боков, Ю. И. Левашов, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков // Геомониторинг на основе соврем. технологий сбора и обработки информации, посвящ., 90-летию К. Л. Проворова : тез. докл. / СГГА. – Новосибирск : СГГА, 1999. – С. 90.

54. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на площадке строительства тоннеля инъекционного комплекса ВЭПП-5 [Текст]. – Новосибирск : ЗапСибТИСИЗ, 1991.

55. Оценка напряженно-деформированного состояния защитных герметичных оболочек на примере блоков Ростовской АЭС [Текст] / Ю. И. Пимшин,

В. Н. Медведев, Г. А. Науменко, В. А. Наугольников, Ю. С. Забазнов // Геодезия и картография. – 2017. – № 3. – С. 36–42.

56. Пискунов, М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений [Текст] / М. Е. Пискунов. – М. : Недра, 1980. – 248 с.

57. Плановая геодезическая сеть модернизированного ускорителя ВЭПП-4м [Текст] / М. А. Боков и др. // Геодезическое и фотограмметрическое обеспечение строительства и эксплуатации инженерных сооружений : научн.-техн. сб. тр. – М., 1991. – С. 45–52.

58. Полянский, А. В. Модульный принцип геодезического сопровождения строительства тоннелей уникальных сооружений [Текст] / А. В. Полянский, М. А. Боков, Ю. И. Левашов // Геомониторинг на основе соврем. технологий сбора и обработки информации, посвящ. 90-летию К. Л. Проворова : тез. докл. – Новосибирск : СГГА, 1999. – С. 89.

59. Пособие по производству геодезических работ в строительстве (к СНиП 3-01.03.-84) [Текст]. – М. : НИИОМТП Госстроя СССР, 1985. – 73 с.

60. Программный комплекс, реализующий обобщенный алгоритм уравнивания геодезических сетей [Текст] / М. Я. Брынь, В. Н. Баландин, А. В. Юськевич и др. // Геодезия и картография. – 1999. – № 11. – С. 11–13.

61. Проект супер С-т фабрики в Новосибирске [Текст]. – Новосибирск : Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 2011. – 156 с.

62. Пупков, Ю. А. Определение ошибки измерения превышений в зависимости от длины визирного луча по невязкам замкнутых нивелирных ходов [Текст] / Ю. А. Пупков // Исследования по геодезии, аэрофотосъемке и картографии. – Вып. 5 (4). – С. 86–90.

63. Пупков, Ю. А. Система допусков на установку магнитов ускорителей на большие энергии [Текст] / Ю. А. Пупков, И. Я. Протопопов, А. Н. Скринский // Геодезические работы при монтаже и эксплуатации технологического оборудования : материалы научн.-техн. конф. – Новосибирск, 1978. – С. 99–103.

64. Пупков, Ю. А. Технические требования на установку в проектное положение магнитных элементов модернизированного ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-4м ИЯФ СО АН СССР [Текст] / Ю. А. Пупков, Ю. И. Левашов. – Новосибирск : ИЯФ, 1987.

65. Сердаков, Л. Е. Геодезическое сопровождение на этапах сборки и эксплуатации модернизируемого источника синхротронного излучения ESRF [Текст] / Л. Е. Сердаков, Д. Мартин, П. П. Мурзинцев // Геодезия и картография. – 2018. – № 11. – С. 2–8

66. Сердаков, Л. Е. Об оптимизации опорных геодезических кольцевых сетей ускорителей при использовании лазерных трекеров [Текст] / Л. Е. Сердаков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский // Геодезия и картография. – 2017. – № 5. – С. 2–6.

67. Сердаков, Л. Е. Создание 3D-модели участка перепускного канала Бустер-Нуклотрон на основе данных геодезических измерений [Текст] / Л. Е. Сердаков // ГеоСибирь-2017: сб. материалов XIII междунар. науч. конгр. – Новосибирск. – 2017. – Т. 1, ч. 1. – С. 63–66.

68. Скрипников, В. А. Применение высокоточных оптико-электронных приборов при измерении деформаций инженерных сооружений [Текст] / В. А. Скрипников // ГЕО-Сибирь-2009 : сб. материалов V Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2009», 20–24 апр. 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА, 2009. – Т. 1, ч. 1. – С. 170–172.

69. Скрипникова, М. А. Возможности применения автоматизированных высокоточных электронных тахеометров при измерении деформаций инженерных сооружений [Текст] / М. А. Скрипникова // ГЕО-Сибирь-2010 : сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010», 19–29 апр. 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск : СГГА, 2010. – Т. 1, ч. 1. – С. 131–134.

70. Смалюк, В. В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях [Текст] / В. В. Смалюк ; Под ред. чл.-корр. РАН Н. С. Диканского. – Новосибирск : Параллель, 2009 – 294 с.

71. СНиП 3.01.03–84. Геодезические работы в строительстве [Текст]. – М. : Госстрой СССР, 1985.
72. СНиП 3.03.01–87. Несущие и ограждающие конструкции [Текст]. – М. : Госстрой СССР, 1987.
73. СНиП 32-04–97 от 29.07.97 № 18-41. Тоннели железнодорожные и автодорожные [Текст]. – М. : Госстрой России, 1998.
74. Соколов, А. А. Основы ускорительной техники [Текст] : учеб. пособие / А. А. Соколов, Е. Г. Комар. – М., 1975.
75. СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Дата введения 01.01.1998 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001219>.
76. СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства [Текст]. – М. : ПНИИС Госстроя России, 1997.
77. СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/213/merged.pdf>.
78. СТО РусГидро 01.01.133–2015. Гидроэнергетическое строительство. Инженерные изыскания при разработке схем территориального планирования и проектной документации. Нормы и требования. Издание официальное, 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/cf8/047_STO-RusGidro-01.01.133-2015_Inzhenernie-iziskaniya.pdf
79. Столбов, Ю. В. Исследование и обоснование допусков на геодезические работы при монтаже промышленных сооружений [Текст] : дисс. канд. техн. наук / Ю. В. Столбов. – М. : МИСИ, 1975. – 141 с.
80. Столбов, Ю. В. Прикладная геодезия. Геодезические разбивочные работы при строительстве зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, Ю. В. Столбова. – Омск : СибАДИ, 2016. – 43 с.
81. Судаков, С. Г. Основные геодезические сети [Текст] / С. Г. Судаков – М. : Недра, 1975. – 368 с.

82. Тамутис, З. П. Проектирование инженерных геодезических сетей [Текст] / З. П. Тамутис. – М. : Недра, 1990. – 138 с.

83. Технические указания по защите бетонных мостовых опор от образования температурных трещин [Текст] / ЦНИИС Минтрансстроя. – М., 1958.

84. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Объединённый ин-т ядерных исследований; под общ. ред. И. Н. Мешкова, Г. В. Трубникова. – Дубна : ОИЯИ, 2015. Т. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://nucloweb.jinr.ru/nica/TDR/2015/TDR_Volume_2.pdf.

85. Травкин, С. В. Разработка методов и средств поверки и калибровки геодезических приборов для измерения превышений [Текст] : автореф. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 25.00.32 / Травкин Сергей Владимирович. – М., 2007. – 25 с.

86. Указания по производству геодезическо-маркшейдерских работ при строительстве подземных коммуникаций закрытыми способами. ВСИ 123-75 [Текст] / Главмосстрой: утв. 30.12.75. – Б. И., 1976. – 34 с.

87. Уставич, Г. А. Об опыте исследования влияния рефракции на результаты точного нивелирования [Текст] / Г. А. Уставич // Геодезия и картография. – 1975. – № 6. – С. 11–12.

88. Уставич, Г. А. Разработка методов, средств и технологий геодезических измерений при монтаже и эксплуатации оборудования инженерных сооружений в условиях влияния возмущающих воздействий [Текст] : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук : 05.24.01 / Уставич Георгий Афанасьевич. – М., 1993. – 48 с.

89. Уставич, Г. А. Технология выполнения высокоточного нивелирования цифровыми нивелирами [Текст] / Г. А. Уставич // Геодезия и картография. – 2006. – № 2. – С. 3–6.

90. Федосеев, Ю. Е. Стратегия и тактика интерпретации результатов геодезического мониторинга деформационных процессов [Текст] / Ю. Е. Федосеев, Е. А. Егорченкова // Наука и Безопасность. – 2011. – № 2 (12), дек.

91. Фетисов, Г. В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ [Текст] / Г. В. Фетисов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 672 с.
92. Физический проект комплекса ВЭПП-5 [Текст]. – Новосибирск, 1995.
93. Хорошилов, В. С. Оптимизация комплекса инженерно-геодезических работ при монтаже технологического оборудования инженерных объектов [Текст] : автореф. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук : 25.00.32 / Хорошилов Валерий Степанович. – СГГА : Новосибирск, 2009. – 20 с.
94. Шоломицкий, А. А. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок [Текст] / А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников, В. И. Адаменко // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2007. – № 3. – С. 27–30.
95. Щербаков, В. В. Моделирование инструментальных съемок [Текст] / В. В. Щербаков, А. В. Андреев // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2010. – № 22. – С. 133–137.
96. Ямбаев, Х. К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве [Текст] / Х. К. Ямбаев. – М. : Недра, 1986. – 264 с.
97. Ямбаев, Х. К. Специальные приборы для инженерно-геодезических работ [Текст] / Х. К. Ямбаев. – М. : Недра, 1990. – 267 с.
98. Allgemeine Vermessungs Nachrichten [Text] / W. Schwarz Die Justierung von Teilchenbeschleunigern. – Heft 1, 1990.
99. API automated precision. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.apisensor.com>.
100. Bernardini, C. AdA: The First Electron-Positron Collider [Text] / Carlo Bernardini // *Phys. perspect.* – 2004. – 6. – P. 156–183.
101. Dale, J. Simulation of the Alignment of Linear Accelerators [Text] / J. Dale, A. Reichold // *Particle accelerator. Proceedings, 23rd Conference, PAC 09, Vancouver, Canada, May 4–8, 2009*.
102. First experimental results at the high power free electron laser at Siberian Center for Photochemistry Research [Text] / E. A. Antokhin, O. B. Kiselev, A. V. Polyanskiy, et al // *Preprint Budker INP 2003–53, Novosibirsk, 2003*.

103. Fridsam, H. Survey and Alignment Report on the Primary Control Network for the APS/ Light Source [Text] / H. Fridsam, J. Penicka, S. Zhao, Note LS–220, 1993.

104. Gassner, G. Instrument tests with new Leica AT401 [Text] / G. Gassner, R. Ruland // IWAA 2010, Bessy Sept 2010.

105. High precision geodesy applied to CERN accelerators [Text] / J. Gervaise and E. J. N. Wilson, CERN, Geneva, Switzerland.

106. ISO10360-2 2009 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions.

107. Laser Tracker API Radian [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.nevatec.ru/Radian/files/Radian.pdf>.

108. Laser Tracker API T3 [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.nevatec.ru/tracker3/files/tracker_api.pdf.

109. Mayoud, M. Metrology for LEP [Text] / M. Mayoud, J. P. Quesnel Applied // CERN Accelerator School, Applied Geodesy for Particle Accelerators, CERN, Switzerland, April, 1987.

110. Precision Alignment of Multipoles on a Girder for NSLS-II [Text] / Animesh Jain. – 17th International Magnetic Measurement Workshop (IMMW17), Barcelona, Spain, 18–23 September, 2011.

111. Pupkov, Yu. A. Matrix method for analysis of network accuracy based on the beam dynamic theory [Text] / Yurii A. Pupkov, Yurii I. Levashov, Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia // Proceedings of the Fourth International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA95), November 14–17, KEK, Tsukuba, 1995.

112. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions [Electronic resource] / BINP, M. Bokov, D. Burenkov, A. Polyanskiy, Yu. Pupkov, Russia and Yu. Levashov, USA, 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004.

113. Spatial Analyzer. User manual [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/SA%20User%20Manual%20\(2014.06.17\).pdf](https://www.kinematics.com/ftp/SA/Install/Documentation/SA%20User%20Manual%20(2014.06.17).pdf)

114. Status of NSLS-II booster [Текст] / Gurov S. M., Burenkov D. B., Karnaev S. E., Serdakov L. E. et al. // Physics Procedia Cep. Proceedings of the International Conference «Synchrotron and Free Electron Laser Radiation: Generation and Application». – SFR. – 2016. – P. 74–81.

115. Status of NSLS-II booster [Text] / S. M. Gurov, E. B. Levichev, A. V. Polyansky, T. V. Shaftan, S. Sharma, D. S. Shichkov et al. // ISSN 1562–6016. BAHT. – 2012. – № 4 (80).

116. Status of the Novosibirsk High Power Free Electron Laser [Text] / Kulipanov G. N., Antokhin E. A., Kiselev O. B., Polyanskiy A. V., et al // Proc. of 3-rd Asian Particle Accelerator conference, Gyeongju, Korea, March 22–26, 2004.

117. Status of the Novosibirsk high power free electron Laser project [Text] / N. A. Vinokurov, Yu. I. Levashov et al. – Free electron laser challenges, 13–14 Feb., 1997, San Jose, California, eds. – P. 185–187.

118. The final alignment of the LHC [Text] / D. Missiaen, T. Dobers, M. Jones, C. Podevin, J.P. Quesnel // CERN, Geneva, Switzerland 10th International Workshop on Accelerator Alignment, KEK, Tsukuba, 11–15 February 2008.

119. Willeke, F. Accelerator Systems Installation [Text] / F. Willeke. – ASD Director 6th ASAC, October 22–23, 2009.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Таблица А.1 – Результаты погрешностей углов и длин линий со станций лазерного трекера спроектированной сети с внесенными случайными погрешностями после уравнивания в программных продуктах Spatial Analyzer и PANDA

№ станции	Измеряемая величина	SA	PANDA
1	Horizontal Angle (sec)	0,8	1,56
	Vertical Angle (sec)	0,6	1,28
	Distance (mm)	0,01	0,03
2	Horizontal Angle (sec)	1,1	1,88
	Vertical Angle (sec)	0,9	1,52
	Distance (mm)	0,01	0,03
3	Horizontal Angle (sec)	1,0	1,08
	Vertical Angle (sec)	0,9	1,04
	Distance (mm)	0,01	0,04
4	Horizontal Angle (sec)	0,7	0,48
	Vertical Angle (sec)	0,6	2
	Distance (mm)	0,01	0,03
5	Horizontal Angle (sec)	0,7	0,56
	Vertical Angle (sec)	0,8	0,8
	Distance (mm)	0,01	0,02
6	Horizontal Angle (sec)	0,9	0,6
	Vertical Angle (sec)	0,8	0,96
	Distance (mm)	0,01	0,04
7	Horizontal Angle (sec)	0,7	0,88
	Vertical Angle (sec)	0,7	1,36
	Distance (mm)	0,01	0,04
8	Horizontal Angle (sec)	0,7	0,6
	Vertical Angle (sec)	0,5	0,92
	Distance (mm)	0,02	0,03
9	Horizontal Angle (sec)	0,6	0,72
	Vertical Angle (sec)	0,5	0,48
	Distance (mm)	0,02	0,03

Таблица А.2 – Разница координат, полученных после уравнивания в Spatial Analyzer и PANDA, от проектных

	Spatial Analyzer			PANDA		
	X (мм)	Y(мм)	Z(мм)	X (мм)	Y(мм)	Z(мм)
GL1	-0,032	-0,014	0,005	0,000	0,000	0,000
GL2	0,015	0,003	0,002	0,040	-0,010	0,000
GL3	-0,006	-0,001	-0,013	-0,050	0,000	0,000
GL4	-0,011	0,017	-0,014	0,030	-0,030	0,000
GL5	0,005	-0,012	0,004	0,000	0,050	0,000
GL6	0,005	-0,005	0,005	0,010	0,060	0,000
GL7	-0,004	0,009	-0,019	0,000	0,000	0,000
GL8	0,006	0,013	-0,008	-0,010	-0,040	0,000
GL9	0,003	-0,002	-0,011	0,000	-0,050	0,000
GL10	0,009	-0,013	-0,021	0,070	-0,030	0,000
GL11	-0,002	0,006	-0,017	0,050	0,000	0,000
GL12	0,005	0,008	-0,040	0,060	-0,010	0,000
GL13	0,000	-0,008	-0,008	0,000	0,000	0,000
GL14	-0,019	-0,013	-0,002	-0,040	0,010	0,000
GL15	-0,017	0,008	0,003	0,050	0,000	0,000
GL16	-0,026	-0,002	0,000	-0,030	0,030	0,000
GL17	-0,017	-0,017	0,011	0,000	0,050	0,000
GL18	-0,027	0,016	0,031	-0,010	0,040	0,000
GL19	-0,041	0,001	-0,013	0,000	0,000	0,000
GL20	-0,037	-0,004	0,008	0,010	0,040	0,000
GL21	-0,011	-0,006	-0,010	0,000	-0,050	0,000
GL22	-0,022	0,003	-0,012	0,030	0,030	0,000
GL23	-0,040	-0,009	0,016	-0,050	0,000	0,000
GL24	-0,009	-0,001	-0,002	0,040	0,010	0,000
GR1	-0,024	-0,011	-0,003	0,000	0,000	0,000
GR2	-0,010	0,008	-0,003	-0,010	0,010	0,000
GR3	0,005	0,017	0,001	-0,040	-0,050	0,000
GR4	-0,004	-0,001	-0,020	0,000	-0,020	0,000
GR5	0,006	-0,002	-0,018	0,050	-0,060	0,000
GR6	-0,034	-0,022	0,001	0,050	0,060	0,000
GR7	-0,036	-0,010	0,008	0,000	0,020	0,000
GR8	-0,027	-0,004	0,013	-0,040	0,050	0,000
GR9	-0,014	0,007	0,014	-0,010	-0,010	0,000

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

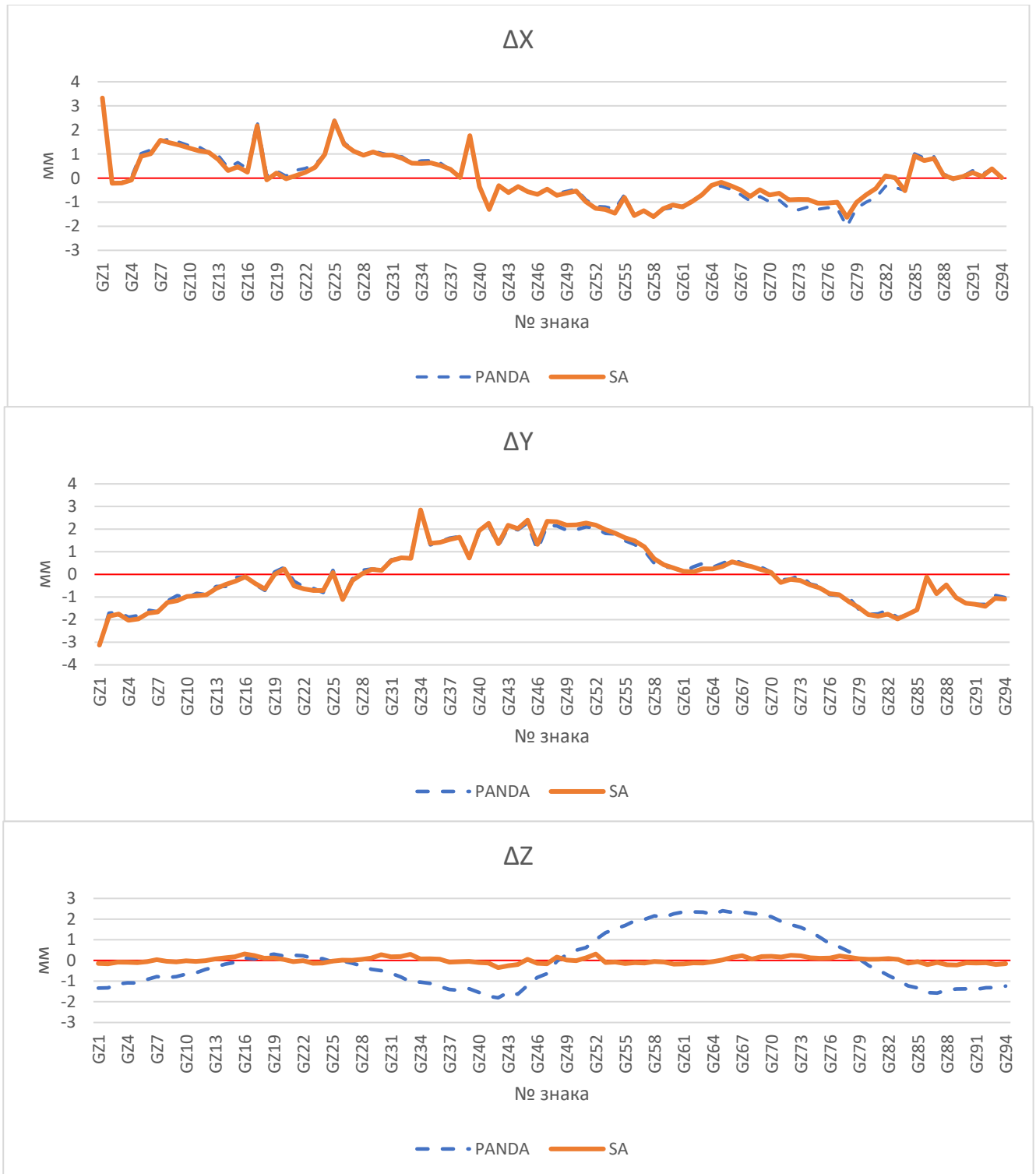


Рисунок Б.1 – Отклонения урвненных значений координат геодезических знаков по результатам урвнивания в Spatial Analyzer и PANDA сети ВЭПП-4М от проектных

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

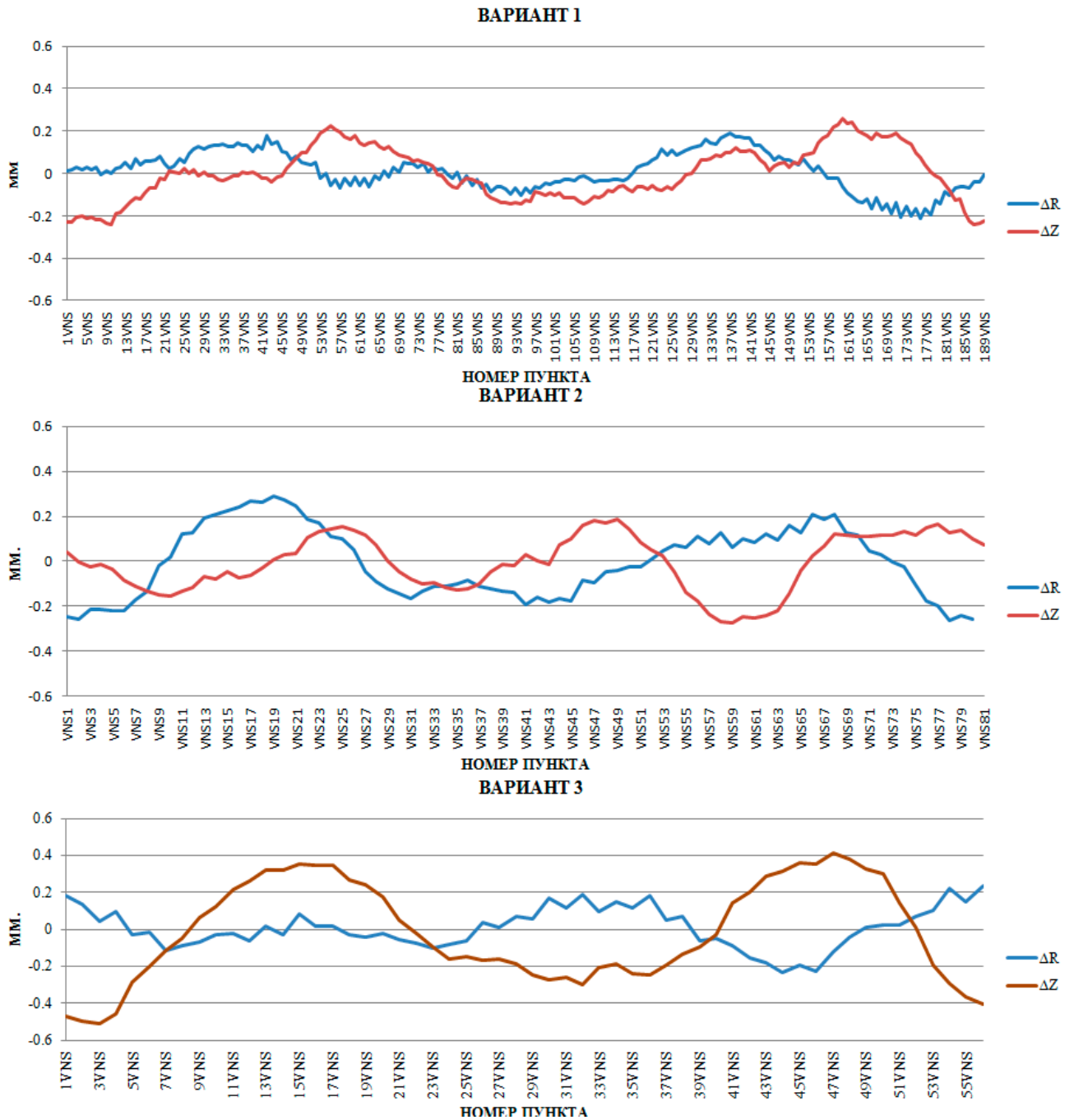


Рисунок В.1 – Отклонения уравненных значений координат геодезических знаков, по результатам уравнивания в Spatial Analyzer для трех вариантов кольцевой пространственной сети периметром 282,7 м, от проектных