

На правах рукописи

Полянский Андрей Викторович



Разработка методики геодезического обеспечения
строительства и эксплуатации
ускорительно-накопительного комплекса
на основе гармонического анализа

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Мурзинцев Петр Павлович.

Официальные оппоненты:

Пимшин Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор кафедры строительных производств;

Азаров Борис Федотович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», заместитель заведующего кафедрой оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Горный университет) (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 22 декабря 2015 г. в 13.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте СГУГиТ.

Материалы по защите диссертации размещены на сайте СГУГиТ: <http://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertationcouncils/dissertations/polyanskiy-andrey/>

Автореферат разослан 30 октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Середович В. А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 20.10.2015. Формат 60×80 1/16.

Печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 10

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, Плахотного, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие науки и наукоемких технологий требует создания различных уникальных сооружений. В этом ряду ускорители заряженных частиц являются одним из основных инструментов исследований в современной физике, и все большее применение находят в других областях: в химии, геофизике, медицине. Эффективность проведения научных экспериментов на ускорительно-накопительных комплексах (УНК) во многом зависит от соблюдения требований к точности создания планово-высотного геодезического обоснования и установки элементов магнитной структуры в проектное положение. Комплексы могут состоять из тысяч единиц оборудования, которые необходимо смонтировать в единое целое с высокой точностью.

Предполагая ошибки установки магнитов случайными и некоррелированными, допуски задаются в виде среднеквадратических отклонений магнитных осей элементов от их расчетного пространственного положения. При таком подходе к заданию требований по точности контроля и юстировки оборудования, при размерах установок в сотни метров допуски получались близкими либо даже превышающими достигнутый на данный момент уровень точности измерений. Впоследствии, при существенном увеличении размеров УНК выполнение установленных требований в прежней формулировке стало физически невозможным. Сформировался новый подход к заданию допусков на точность выверки оборудования, основанный на учете корреляции ошибок установки магнитных элементов.

Создание современного УНК, с точки зрения соблюдения его геометрических параметров, предполагает наличие в том или ином объеме геодезической составляющей практически на всех стадиях этого процесса. Важной научно-технической задачей является разработка комплекса инженерно-геодезических измерений с соблюдением преемственности данных при проектировании, изготовлении, монтаже физического оборудования и эксплуатации ускорителей.

При этом актуальна проблема выделения и формирования необходимых связей геодезического обеспечения на всех стадиях создания и эксплуатации ускорительного комплекса. Конструктивный научно-технический подход специалистов разных областей технического знания к вопросам определения критичности тех или иных геометрических параметров для нормальной работы ускорителя является важным условием формирования методических решений в этой области применения инженерной геодезии.

Интерес мирового сообщества к эксплуатации Большого андронного коллайдера, создание ряда синхротронных центров (ALBA, NSLS-II, MAX IV), модернизация отечественных ускорительно-накопительных комплексов свидетельствуют об актуальности исследований в области геодезического обеспечения создания ускорителей заряженных частиц.

Степень разработанности темы. Научные исследования, разработка новых методик для высокоточных измерений, а также выполнение самих измерений проводятся усилиями многих научных коллективов во всем мире. Вопросы, связанные с высокоточной юстировкой элементов ускорителей, обсуждаются на научных конференциях, а также на специализированном международном форуме (International Workshop on Accelerator Alignment – IWAA).

Теоретические и практические основы специальных геодезических работ по высокоточной юстировке элементов ускорителей были заложены в трудах: Большакова В. Д., Бывшева В. А., Васютинского Ю. И., Ключина Е. Б., Лебедева Н. Н., Новака В. Е., Пискунова М. Е., Пупкова Ю. А., Рязанцева Г. Е., Ямбаева Х. К., Жервеза Ж., Лоеффлера Ф., Руланда Р., Майоуда М. и других. Разработке методов, средств и технологий геодезических измерений при монтаже и эксплуатации оборудования инженерных сооружений посвящены труды Асташенкова Г. Г., Жукова Б. Н., Михелева Д. Ш., Конусова В. Г., Пимшина Ю. И., Федосеева Ю. Е., Уставича Г. А. и других. Однако, в связи с активным применением в геодезических работах на ускорителях лазерных трекеров, возникает необходимость в разработке технологических и методических реко-

мендаций по созданию пространственных геодезических сетей. Востребованы современные методики интерпретации результатов многолетних геодезических измерений с существенным повышением информативности о деформационных процессах кольцевых тоннелей ускорителей.

Цели и задачи исследования. Цель научного исследования заключалась в разработке и реализации методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа, позволяющей уточнять объем, состав, порядок геодезических измерений на этапах создания ускорителя и повысить информативность результатов геодезического мониторинга с оценкой влияния на эксплуатацию уникального оборудования.

Для достижения поставленной цели решены следующие *основные задачи*:

- анализ подходов к геодезическому обеспечению стадий проектирования, строительства и эксплуатации УНК, определение круга методических и технологических аспектов, требующих исследований;
- методологическое обоснование и разработка структурной схемы геодезического обеспечения стадий создания УНК с учетом технологических связей и опыта создания отечественных и зарубежных ускорителей;
- разработка и внедрение методики геодезического обеспечения стадий создания бустера NSLS-II на основе модульного принципа сборки;
- разработка и исследование способа интерпретации результатов геодезического мониторинга вертикальных деформаций кольцевых тоннелей ускорителей на основе гармонического анализа;
- разработка рекомендаций по модернизации и созданию геодезических сетей УНК, ориентированных на применение лазерных трекеров.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

- разработанная структурная схема геодезического обеспечения стадий создания УНК с учетом технологических связей формирует комплексный подход и обеспечивает преемственность геодезических работ для дальнейшей мо-

дернизации или строительства новых установок на базе действующих с их объединением в единый комплекс;

– разработанная методика определения деформационных параметров тоннеля ускорителя на основе гармонического анализа позволяет из величин смещения знаков геодезической сети выделить составляющие и соотнести их с различными по длине участками тоннеля, при этом достигается качественная оценка опасных деформаций для нормальной эксплуатации уникального оборудования;

– разработанный алгоритм позволяет оценить влияние погрешностей определения плановых координат уникального оборудования геодезическими средствами измерений на искажение орбиты на примере бустера NSLS-II, при модульном принципе сборки.

В отличие от применяемых ранее методик геодезического обеспечения УНК, вводится единая система координат для проектирования, изготовления и монтажа магнитной структуры ускорителя, предлагается новый критерий для характеристики плотности пунктов пространственной высокоточной инженерно-геодезической сети в кольце тоннеля.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в методологическом обосновании возможности повышения информативности о деформационных процессах с применением гармонического анализа для разложения величины вертикального смещения кольцевого тоннеля на составляющие и разработке алгоритма оценки максимальных относительных вертикальных деформаций кольцевых тоннелей ускорителей.

Практическое значение работы заключается во внедрении разработанной структурной схемы геодезического обеспечения этапов создания УНК с учетом технологических связей в процесс создания ускорителя и получении эффективной реализации проекта бустера NSLS-II. На основе стратегии, заложенной в структурной схеме, разработана методика геодезического обеспечения создания бустера NSLS-II, которая поэтапно успешно решила частные задачи проектирования, изготовления и монтажа, с сокращением срока строи-

тельства на три-четыре месяца. Методика позволила выполнить установку магнитных элементов относительно расчетной орбиты со среднеквадратической погрешностью в 0,1 мм. Определены зависимости среднеквадратических погрешностей измерений в продольном и поперечном направлениях относительно визирного луча лазерного трекера от расстояния для нахождения оптимальной дистанции между прибором и юстируемыми элементами модулей бустера NSLS-II.

Методология и методы исследования включают в себя проведение теоретических исследований с использованием методов статистической обработки результатов измерений, методов гармонического и корреляционного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

– методические решения по геодезическому обеспечению стадий создания бустера NSLS-II на основе модульного принципа сборки позволяют путем наполнения необходимой геодезической составляющей стадий проектирования, изготовления и монтажа обеспечить требуемую точность положения оборудования в режиме эксплуатации и повысить эффективность реализации научного проекта;

– способ интерпретации результатов геодезического мониторинга вертикальных деформаций кольцевых тоннелей ускорителей и алгоритм оценки максимальных относительных вертикальных деформаций на основе гармонического анализа позволяют дополнить информацию о деформационных процессах на территории УНК.

Степень достоверности результатов. Результаты исследования, выводы и практические рекомендации обсуждались и докладывались:

– на VII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2011» (г. Новосибирск, 27–29 апреля 2011 г.);

– на VIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012» (г. Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.);

– на IX Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013» (г. Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.).

Разработанные методики реализованы при выполнении работ: контракт № 159315 (NSLS-II Booster.), контракт № ОК-08-ОКС/2013 (Реконструкция наземной опорной геодезической сети уникального объекта (С-тау фабрики) комплекса ВЭПП-5 ИЯФ СО РАН).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность темы исследования и степень ее разработанности, обоснованы цель и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и реализации результатов работы, ее структура, а также научные положения, выносимые на защиту.

В *первом разделе* выявлено, что главной особенностью геодезического обеспечения создания УНК является необходимость учета тенденций строительства новых ускорительных установок на базе уже действующих с их объединением в единую систему. Обобщен зарубежный и отечественный опыт в данной сфере и делается вывод о том, что в настоящее время остро стоит вопрос разработки комплексной организации геодезического обеспечения при создании и эксплуатации УНК. Так, УНК высоких энергий с размерами в километры и в десятки километров создаются усилиями многих стран. В будущем размеры УНК, возможно, вырастут до сотен километров. Количество физического оборудования, для которого необходим высокоточный монтаж, существенно возросло и может стать колоссальным.

Второй раздел посвящен исследованиям структуры и состава комплекса геодезических работ, средств измерений, оценке влияния погрешностей юстировки при эксплуатации ускорителей.

Одна из задач диссертационного исследования заключалась в разработке структурной схемы геодезического обеспечения стадий создания УНК с учетом технологических связей (рисунок 1).



Рисунок 1 – Структурная схема геодезического обеспечения стадий создания УНК с учетом технологических связей

При создании современных УНК имеется два взаимосвязанных процесса:

- создание физического оборудования;
- строительство сооружений для размещения физического оборудования.

Эти процессы имеют свои этапы реализации. Для соблюдения требуемых геометрических параметров и эффективного взаимодействия процессов для каждого этапа требуется создать необходимую и достаточную геодезическую составляющую, а также выявить технологические связи и определить порядок взаимодействия. Эта задача может быть успешно решена, если процессы реализуются в единой системе координат, которая позволяет обеспечить полное согласование в пространстве всех составных частей УНК.

На основе предложенной в структурной схеме стратегии геодезического обеспечения стадий создания УНК и конкретных технических заданий могут

быть разработаны специальные комплексные проекты производства геодезических работ (ППГР) проектируемых УНК. Наполнение этих специальных ППГР методическими решениями является актуальной научно-технической задачей.

В 2010 г. Институт ядерной физики СО РАН приступил к проектированию и производству бустера для проекта NSLS-II Брукхейвенской лаборатории. Геодезическое обеспечение при проектировании бустера NSLS-II включало в себя решение нескольких задач. *Первая задача* – оптимизировать количество и расположения геодезических знаков на элементах структуры бустера NSLS-II. Критериями оптимизации количества и расположения геодезических знаков на элементах бустера являлись наличие видимости на максимальное число знаков при различных схемах измерений с сохранением видимости как минимум на три знака и распределение знаков на элементах с максимально возможными расстояниями друг относительно друга. Геодезические знаки выполнены в виде отверстия диаметром 6,35 мм +0,01 мм перпендикулярно (не более 0,015 мм) к шлифованной площадке диаметром 50 мм. *Вторая задача* заключалась в назначении системы координат единой как для проектирования пространственного положения структуры бустера NSLS-II, так и для выполнения монтажа и юстировки. *Третья задача* – формирование каталога проектных координат орбиты бустера в узловых точках элементов структуры, для вставки реальных магнитных элементов в расчетное положение в структуре и получения проектных координат геодезических знаков элементов. *Четвертой задачей* являлось проектирование и разработка модульного принципа сборки бустера NSLS-II. При непосредственном участии автора разработан проект модульной сборки бустера. Структура бустера разделена на 44 модуля длиной от 1,3 до 3,5 м. Физически модуль представляет балку (гирдер), на который монтировались элементы магнитной структуры ускорителя с общей вакуумной камерой. Модули состоят в среднем из шести элементов, требующих точной юстировки. Магнитные элементы относительно гирдера имеют диапазон юстировки $\pm 2,5$ мм. Общий вид некоторых модулей представлен на рисунке 2.

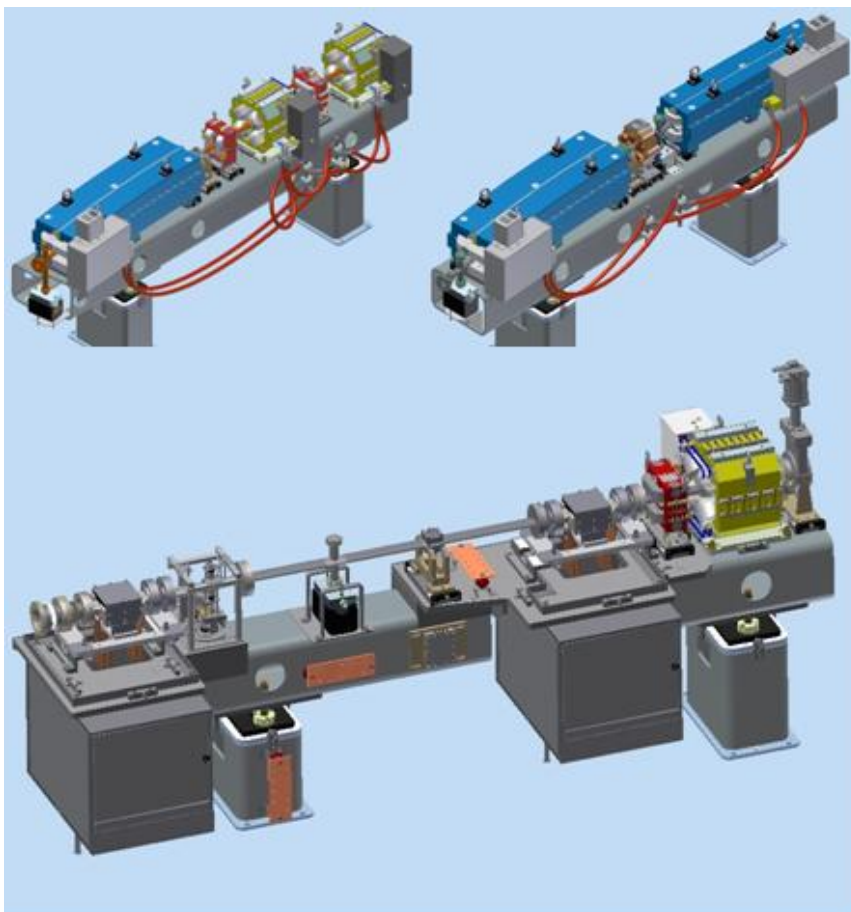


Рисунок 2 – Модули бустера NSLS-II

На стадии изготовления гирдеров проводился геодезический контроль соответствия критичных геометрических параметров изделия проекту:

- отклонение от плоскостности опорных установочных площадок для дипольных магнитов ($\pm 0,06$ мм);
- взаимное плановое положение центров опорных установочных площадок для всех магнитных элементов ($\pm 0,15$ мм).

Критичность выбранных для геодезического контроля геометрических параметров гирдера определялась вкладом параметра в конечную погрешность юстировки массивных магнитных элементов модуля (диполи, квадруполи) с учетом заложенного в конструкцию диапазона юстировки.

На стадии сборки модулей требовалось определить взаимное положение геодезических знаков на магнитных элементах и положение геодезических зна-

ков относительно магнитной оси элемента. Магнитные оси элементов структуры бустера определялись при магнитных измерениях. Геодезические измерения с применением API Laser Tracker позволили определить положение геодезических знаков относительно магнитной оси для диполя с $\sigma = 0,065$ мм, для квадруполя, секступоля с $\sigma = 0,035$ мм. Для сборки модулей узловые точки магнитных осей элементов совмещались с узловыми точками проектной орбиты пучка для этих элементов и находились проектные координаты геодезических знаков элементов структуры бустера NSLS-II. Далее элементы структуры бустера монтировались на гирдер и юстировались в проектное взаимное положение, определялось их положение относительно геодезических знаков гирдера. По результатам геодезических измерений API Laser Tracker положение магнитных элементов относительно расчетного определено с $\sigma = 0,085$ мм. Положение магнитных элементов относительно проектной орбиты определено со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,107$ мм. На основе результатов измерений сформирован каталог координат геодезических знаков элементов и гирдеров в системе координат бустера.

Геодезическое обеспечение стадий создания бустера NSLS-II сформировано на основе анализа исходных данных и принятых технических решений. Их состав представлен в таблице 1.

Таблица 1

Стадии	Исходные данные	Технические решения	Геодезическая составляющая
Проектирование	1 Каталог координат узловых точек орбиты пучка. 2 Технические характеристики магнитных элементов. 3 Спектральная чувствительность магнитной структуры ускорителя	1 Количество и габариты модулей. 2 Рабочие диапазоны и конструкция юстировочных узлов магнитных элементов и модулей. 3 Конструкция гирдеров модулей, адаптированная для геодезического контроля	1 Оптимизация количества и расположения геодезических знаков на элементах. 2 Моделирование опорной геодезической сети для оптимизации по спектральному составу ошибок определения координат

Окончание таблицы 1

Стадии	Исходные данные	Технические решения	Геодезическая составляющая
Изготовление	1 Точности, заложенные в техническом задании. 2 Каталог координат узловых точек орбиты пучка	1 Конструкция стапелей и кареток для магнитных измерений, адаптированная для геодезического контроля	1 Создание опорных сетей стапелей. 2 Определение взаимного положения геодезических знаков и узловых точек магнитной оси элементов. 3 Создание каталога координат геодезических знаков магнитных элементов. 4 Геодезический контроль изготовления гирдеров модулей
Монтаж	1 Каталог координат геодезических знаков магнитных элементов. 2 Проект размещения и компоновки физического оборудования в тоннеле ускорителя	1 Количество и расположение геодезических знаков опорной сети в тоннеле ускорителя. 2 Технология сборки модулей	1 Создание опорной геодезической сети в тоннеле ускорителя. 2 Геодезическое обеспечение сборки модулей. 3 Геодезическое обеспечение монтажа модулей в тоннеле
Эксплуатация	1 Каталог координат геодезических знаков магнитных элементов. 2 Каталог координат геодезических знаков опорной сети в тоннеле ускорителя. 3 Реальные условия и компоновка радиационной защиты	1 Оптимизация схем измерений в геодезической опорной сети	1 Геодезический мониторинг. 2 Юстировка магнитных элементов ускорителя

Методом определения координат при измерениях лазерным трекером является пространственная полярная засечка, при которой измеряются горизонтальные β , вертикальные ν углы и расстояния S до уголкового отражателя.

Координаты центра уголкового отражателя

$$X_{omp} = S \cos \nu \cos \beta ; \quad (1)$$

$$Y_{omp} = S \cos \nu \sin \beta ; \quad (2)$$

$$Z_{omp} = S \sin \nu . \quad (3)$$

Погрешности определения координат центра уголкового отражателя

$$m_{X_{omp}} = \sqrt{(\cos \nu \cos \beta)^2 m_s^2 + (S \cos \nu \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 + (S \sin \nu \cos \beta)^2 \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2} ; \quad (4)$$

$$m_{Y_{\text{опр}}} = \sqrt{(\cos \nu \sin \beta)^2 m_S^2 + (S \cos \nu \cos \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 + (S \sin \nu \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2}; \quad (5)$$

$$m_{Z_{\text{опр}}} = \sqrt{(\sin \nu)^2 m_S^2 + (S \cos \nu)^2 \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2}, \quad (6)$$

где m_S , m_β , m_ν – соответственно, погрешности определения расстояния, горизонтального угла, вертикального угла. При совмещении оси X с визирным лучом получим: $m_X = m_S$, $m_Y = Sm_\beta$, $m_Z = Sm_\nu$.

По результатам многократных измерений автором проведены исследования зависимости погрешности измерения API Tracker в продольном и поперечном направлениях относительно визирного луча от расстояния. По методу наименьших квадратов численным решением найдены коэффициенты и получены выражения

$$m_S = (0,0068 + 0,0025L) \text{ мм}; \quad (7)$$

$$m_Y = (0,0022 + 0,0048L) \text{ мм}; \quad (8)$$

$$m_Z = (0,0011 + 0,0048L) \text{ мм}, \quad (9)$$

где L – расстояние от прибора до отражателя в метрах.

Проведенные исследования показали, что для расстояний от 1,5 до 3,0 м среднеквадратические погрешности m_s, m_y, m_z находятся в диапазоне ± 5 мкм (рисунок 3).

Модульный способ сборки бустера хорошо вписывается в концепцию специального метода, основанного на применении сглаживающих кривых. Этот метод предполагает приведение магнитов к трендовой кривой, которая может отклоняться от расчетной орбиты. Расчет спектральной чувствительности структуры бустера показывает, что 10-я гармоника наиболее критична для работы ускорителя (рисунок 4). Длина бетатронной волны и длина волны 10-й гармоники для структуры бустера составит около 16 м.

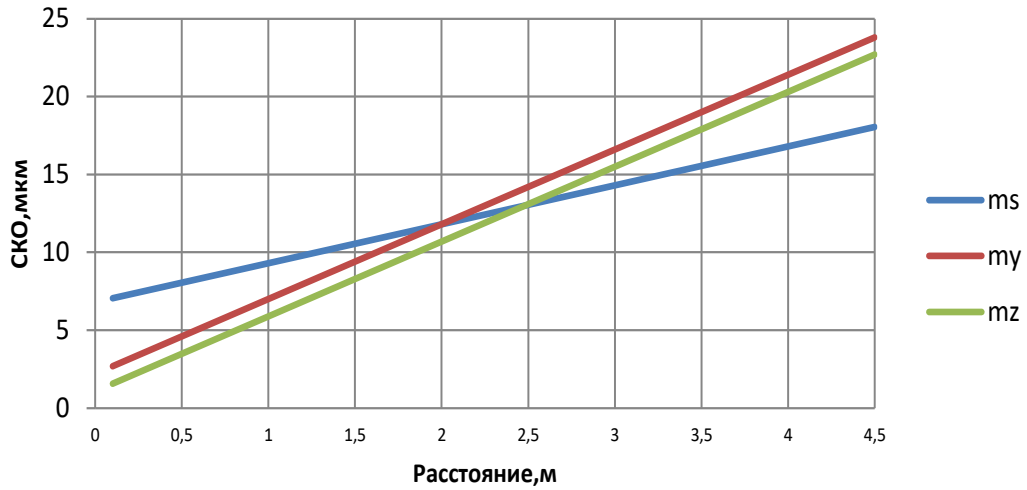


Рисунок 3 – График зависимости погрешностей m_s, m_y, m_z от расстояния

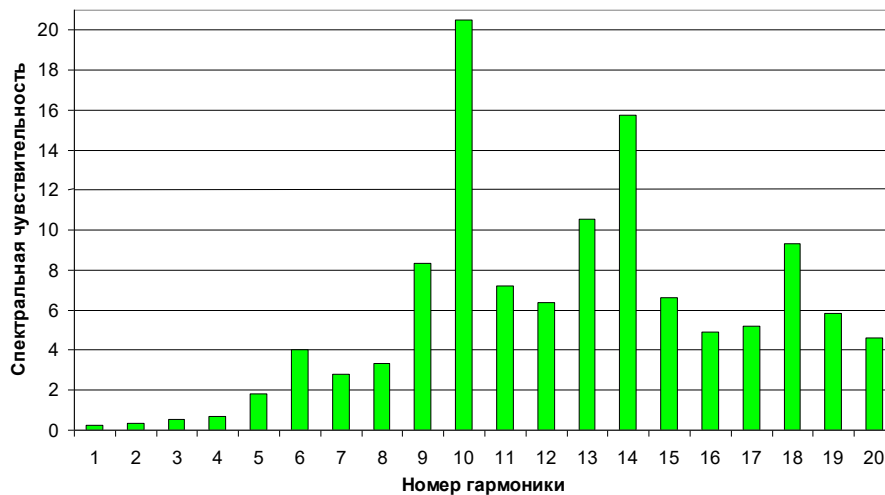


Рисунок 4 – Спектральная чувствительность магнитной структуры бустера NSLS-II

Спектральная чувствительность γ_k к гармонике возмущения k есть наибольшая величина относительного отклонения искаженной замкнутой орбиты при воздействии возмущения с единичной амплитудой. Если возмущение – это сумма n гармонических функций, тогда оценка максимального искажения будет

$$y_{\max} = \sum_{k=1}^n (\gamma_k a_k). \quad (10)$$

Гармонику следует считать критичной, если произведение амплитуды гармоники на соответствующий коэффициент спектральной чувствительности вносит вклад (10–15 %) в искажение орбиты частиц от допустимого, которое принимается как 1/10 минимального размера вакуумной камеры. Для некритичной гармоники должно выполняться условие: $a_k \leq 0.1 y_{\text{дон}} / \gamma_k$.

При построении сглаживающей кривой на практике выполняется следующее. Проводится цикл геодезических измерений по определению положения элементов структуры ускорителя. Находятся отклонения элементов от проектного положения ΔR_i , далее вычисляются амплитуды гармоник, проводится Фурье-анализ результатов по формуле:

$$a_k = \sqrt{c_k^2 + b_k^2}, \quad (11)$$

где $c_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta R_i \cos\left(\frac{2\pi k S_i}{P_0}\right);$

$$b_k = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta R_i \sin\left(\frac{2\pi k S_i}{P_0}\right);$$

P_0 – периметр установки;

n – число точек;

k – номер гармоники;

S_i – текущая продольная координата точки i .

Спектральная чувствительность бустера NSLS-II показана на рисунке 4, а на рисунке 5 – спектральный состав погрешностей определения плановых координат в геодезической сети бустера NSLS-II. Рассматривая значения спектральной чувствительности, видно, что они растут с увеличением номера гармоники, имея первый максимум при $k = 6$ и второй при $k = 10$. Амплитуды по-

грешностей определения плановых координат имеют наибольшие значения для первых трех гармоник.

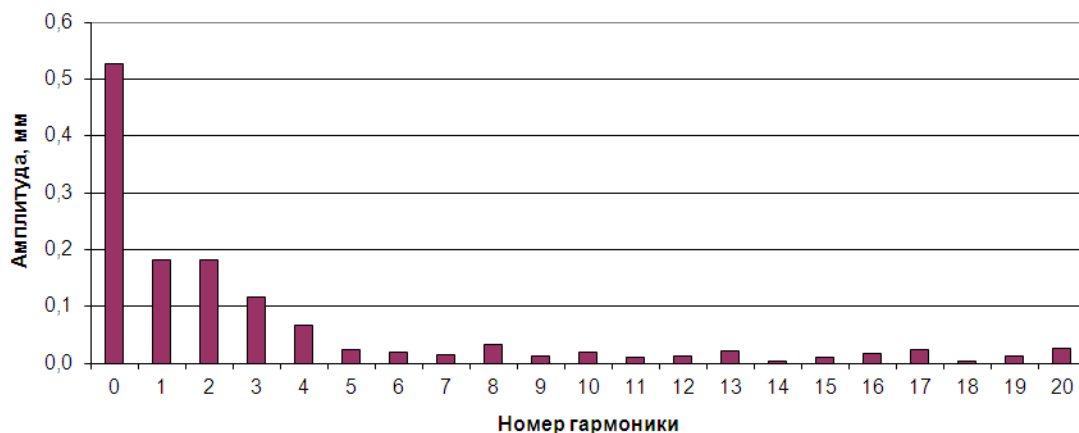


Рисунок 5 – Спектральный состав погрешностей определения плановых координат в сети бустера NSLS-II

Это значит, что в сети недостаточно хорошо определяется масштаб или неопределенность среднего диаметра кольца составляет $\pm 0,5$ мм (нулевая гармоника), а неопределенность радиусов двух полуколец составляет $\pm 0,2$ мм (первая гармоника) и отличие двух перпендикулярных диаметров от их номинала можно определить не точнее $\pm 0,2$ мм. При максимальном допустимом искажении орбиты $y_{\text{доп}} = 2$ мм; допуск на амплитуды первой и второй гармоники составит: $a_1 = 0,1 \frac{y_{\text{доп}}}{\gamma_1} = 0,1 \frac{2}{0,2} = 1,0$ мм и $a_2 = 0,1 \frac{2}{0,3} = 0,67$ мм.

Каждая гармоника имеет влияние на орбиту пучка частиц $a_k \times \gamma_k$, и от того, сколько и какие гармоники входят в состав сглаживающей кривой $u = \sum a_k \times \gamma_k$ зависит величина искажений орбиты (рисунок 6). Шестая гармоника является первой критичной. Формально до двадцатой гармоники включительно рубеж максимального искажения орбиты в 2 мм не достигнут. Но из-за того, что для реальных магнитных структур резонансными являются не только гармоники, близкие к частоте бетатронных колебаний, но и суммовые и раз-

ностные, включать в состав сглаживающей кривой рекомендуется только гармоники до первой критичной. Следовательно, сглаживающая кривая может включать в себя гармоники до пятой включительно.

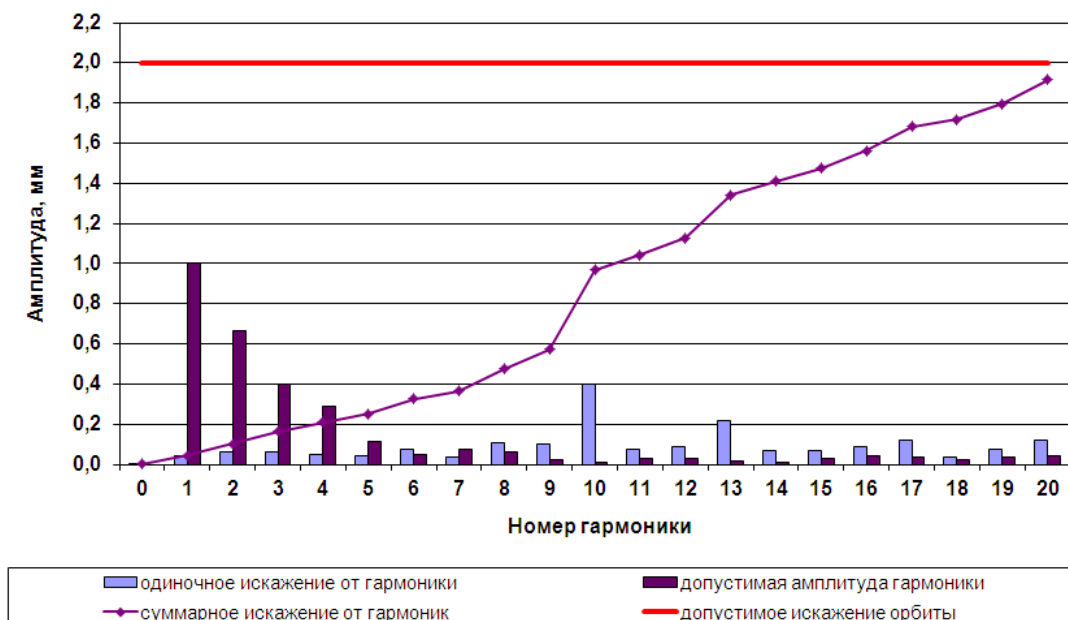


Рисунок 6 – График зависимости искажений орбиты бустера NSLS-II от гармоник возмущения, вызванных погрешностями юстировки

Третий раздел посвящен исследованиям по созданию плано-высотного обоснования и повышению информативности при интерпретации данных многолетних геодезических наблюдений за вертикальными деформациями кольцевых тоннелей УНК с применением гармонического анализа.

На ускорительном комплексе ВЭПП-4м ИЯФ СО РАН геодезический мониторинг вертикальных деформаций кольцевого тоннеля с *периметром* 366 м осуществляется методом геометрического нивелирования коротким визирным лучом из середины с использованием нивелиров типа Ni-007.

Точность измерения превышений, рассчитанная по невязкам полигонов из 16 циклов измерений, составляет $\sigma = 0,025$ мм. На рисунке 7 представлен график осадок тоннеля ВЭПП-4м за период 2001–2013 гг.

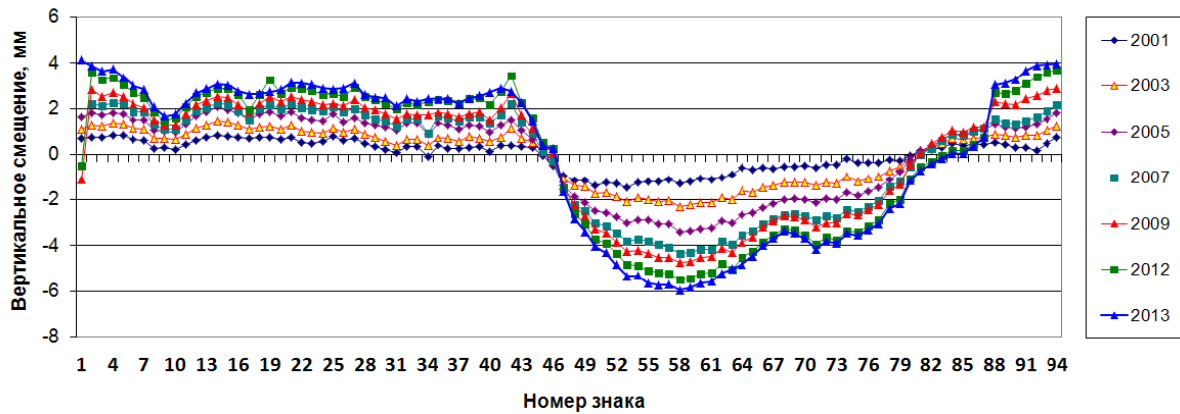


Рисунок 7 – График осадок тоннеля ВЭПП-4м

Спектральное представление вертикальных деформаций кольцевого тоннеля как дополнительный инструмент анализа предполагает, что длина волны каждой гармоники на периметре тоннеля определяет протяженность участка, на котором реализуется вертикальное смещение знаков высотной сети на величины амплитуд данной гармоники, что позволяет выделить из величины вертикального смещения знака сети составляющие, относящиеся к различным в масштабе объекта деформациям. Для реализации представления вертикальных деформаций в спектральном виде на практике выполняется следующее. Проводится цикл геодезических измерений по определению высотного положения знаков сети. Измерения обрабатываются, находятся отклонения отметок от средней отметки в данном цикле ΔH_i , далее вычисляются амплитуды гармоник

$$a_k = \sqrt{\left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \cos\left(\frac{2\pi k S_i}{P}\right)\right)^2 + \left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \sin\left(\frac{2\pi k S_i}{P}\right)\right)^2}, \quad (12)$$

где P – периметр тоннеля;

n – число точек;

k – номер гармоники;

S_i – текущая продольная координата точки i .

Спектральный состав вертикальных деформаций тоннеля ВЭПП-4м за период 2001–2013 гг., полученный по данному алгоритму, показан на рисунке 8. Для анализа результатов, представленных на гистограмме, следует периметр тоннеля разделить на номер гармоники и получить протяженность участка, на котором реализуется вертикальное смещение, аппроксимируемое гармонической функцией.

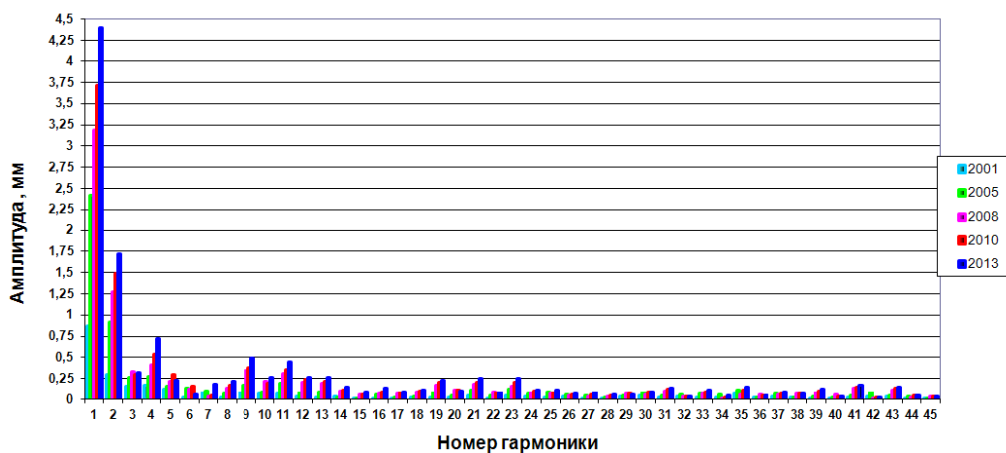


Рисунок 8 – Спектральный состав вертикальных деформаций тоннеля ВЭПП-4м

Точность определения величины амплитуд гармоник с учетом корреляционной зависимости в высотной сети представлена на графике (рисунок 9).



Рисунок 9 – Точность определения величины амплитуд гармоник

Отношение величины амплитуды гармоники к $\frac{1}{4}$ части длины ее волны есть величина относительного вертикального смещения. Следовательно, сумма относительных вертикальных смещений всех гармоник, начиная со второй, есть максимально возможная величина относительной вертикальной деформации $Dz_{\text{отн}}$ кольцевого тоннеля для данного цикла геодезических измерений

$$Dz_{\text{отн}} = \sum_{k=2}^n \frac{a_k 4k}{P} \quad (13)$$

где a_k – амплитуда гармоники;

P – периметр тоннеля;

n – число гармоник;

k – номер гармоники.

Применение предлагаемого подхода параллельно с анализом вертикальных смещений тоннеля решает задачу оценки влияния этих смещений на искажение орбиты ускорителя. Сопоставление спектральной чувствительности ускорителя и спектрального состава деформаций тоннеля позволяет делать выводы о критичности деформаций для нормальной работы ускорителя. Такое сопоставление возможно при достаточной плотности пунктов геодезической сети в тоннеле, позволяющей выполнить аппроксимацию результатов наблюдения гармониками с характерными длинами волн.

В данном методе анализа вертикальных деформаций тоннеля ВЭПП-4м нулевая гармоника (изменение плоскости относимости) не рассматривается, что на практике позволяет более длительное время сохранять положение физического оборудования ускорителя в пределах рабочего диапазона юстировочных узлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

– по итогам анализа отечественных и зарубежных методик геодезического обеспечения строительства и эксплуатации УНК установлено, что главной особенностью является необходимость учета фактора строительства новых установок, на базе уже действующих, с объединением их в единую систему;

– методологически обоснованная, разработанная и реализованная структурная схема геодезического обеспечения стадий создания УНК, с учетом технологических связей, может быть использована в качестве элемента согласования в пространстве и времени двух взаимосвязанных процессов, создания физического оборудования и строительства сооружений для его размещения; формируется комплексный подход с целью обеспечения преемственности геодезических работ;

– разработанная методика геодезического обеспечения УНК при модульном принципе сборки позволяет определить положения магнитных элементов относительно расчетной орбиты с величиной среднеквадратической погрешности в 0,1 мм и выполнить оценку влияния погрешностей юстировки на искажение орбиты; методика реализована и обеспечила успешное решение научно-технической задачи по созданию бустера NSLS-II, где модульный принцип сборки позволил вести строительство тоннеля и монтаж физического оборудования в параллельном режиме, что сократило сроки создания ускорителя на три-четыре месяца;

– алгоритм оценки максимальных относительных вертикальных деформаций кольцевых тоннелей ускорителей, разработанный автором на основе гармонического анализа, и способ интерпретации результатов геодезического мониторинга позволяют оценить изменение жесткости тоннеля и определить величины вертикальных деформаций на длине бетатронной волны, где наиболее критично нарушение допусков;

– для равного влияния действия погрешностей по направлениям при проведении геодезического контроля физического оборудования рекомендуем проводить измерения лазерными трекерами API в радиусе от 1,5 до 3 м. При формировании схемы измерений для большинства ускорителей в качестве

оптимальных можно рекомендовать расстояние между станциями около 10 м, зону перекрытия со смежными станциями – порядка 20 м;

– при создании и модернизации вторичных геодезических сетей ускорителей, ориентированных на применение лазерных трекеров, сеть целесообразно создавать в виде пространственных линейно-угловых построений с высокой плотностью пунктов сети, в два-три раза выше по сравнению с традиционными (0,25 пункта на один погонный метр тоннеля для ВЭПП-4м до 0,68 пункта для бустера NSLS-II).

Результаты диссертационных исследований могут использоваться при строительстве и эксплуатации отечественных и зарубежных ускорительно-накопительных комплексов, а также получить распространение на строительство других уникальных сооружений. Перспективы научных исследований, представленных в диссертации, несомненны и их целесообразно продолжить в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Геодезическое обеспечение создания бустера для NSLS-II [Текст] / Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Пупков Ю. А., Сердаков Л. Е. // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 13–16.

2 Полянский, А. В. Спектральное представление вертикальных деформаций кольцевого тоннеля ускорителя ВЭПП-4М [Текст] / Полянский А. В., Пупков Ю. А., Мурзинцев П. П. // Геодезия и картография. – 2014. – № 3. – С. 10–13.

3 О геодезическом сопровождении BOOSTER NSLS-II Брукхейвенской национальной лаборатории министерства энергетики США [Текст] / Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Пупков Ю. А., Сердаков Л. Е. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материа-

лов в 3 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.). – Новосибирск: СГГА, 2012. Т. 1. – С. 183–188.

4 Геодезический мониторинг вертикальных деформаций тоннелей ускорительных комплексов ИЯФ СО РАН [Текст] / Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Полянский А. В., Пупков Ю. А., Сердаков Л. Е. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1. – С. 128–132.

5 Исследования зависимости погрешностей геодезических измерений в продольном и поперечном направлениях относительно визирного луча API Tracker 3 от расстояния [Текст] / Полянский А. В., Буренков Д. Б., Мурзинцев П. П., Пупков Ю. А., Сердаков Л. Е. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. – С. 3–6.

6 Status of NSLS-II booster [Text] / S. Gurov, A. Erokhin, S. Karnaev, V. Kiselev, E. Levichev, A. Polyansky, A. Semenov, S. Shiyankov, S. Sinyatkin, V. Smaluk, T. Shaftan, H. Hseuh // Proceedings of IPAC 2013, Shanghai, China, ISBN 978-3-95450-122-9 198.

7 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. // ВАНТ. – 2012. – № 4 (80). ISSN 1562-6016.

8 Status of NSLS-II booster [Electronic resource] / S. Gurov, E. Levichev, V. Neyfeld, I. Okunev, V. Petrov, A. Polyansky et al. // PAC'11, New-York, 2011, WEP201, p. 437. – Mode of access: <http://www.JACoW.org>.

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