

П.П. Мурзинцев
Д.Б. Буренков
А.В. Полянский
Л.Е. Сердаков

Геодезическое обеспечение
проектирования, строительства,
эксплуатации и мониторинга
ускорительно-накопительных
КОМПЛЕКСОВ

Новосибирск
2021

УДК 528.3:621.384

ББК 26.12+22.38

Г35

Рецензенты:

Костюченко В. Я., доктор физ. мат. наук, доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»;

Щербаков В. В., д.т.н., доцент, зав. кафедрой инженерной геодезии, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет путей сообщений»

Авторы:

доцент, к.т.н. П. П. Мурзинцев, к.т.н. А. В. Полянский,
к.т.н. Д. Б. Буренков, к.т.н. Л. Е. Сердаков

Под общей редакцией доцента, к.т.н. П. П. Мурзинцева

Геодезическое обеспечение проектирования, строительства, эксплуатации и мониторинга ускорительно-накопительных комплексов : монография / П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Д. Б. Буренков, Л. Е. Сердаков; под общей редакцией П. П. Мурзинцева – Новосибирск : Агентство «Сибпринт», 2021. – 232 с. : илл.
ISBN 978-5-94301-863-3

В монографии обобщен опыт создания отечественных и зарубежных ускорителей заряженных частиц. Излагаются новые подходы к проектированию и строительству ускорительно-накопительных комплексов (УНК) с учетом методов и технологий активно применяющихся в настоящее время и перспективные направления их развития. В качестве главной особенности показана необходимость учета фактора создания новых установок на базе уже находящихся в эксплуатации. Предложены методологические и технологические решения для создания УНК с учетом технологических связей, модульного принципа сборки.

Рекомендуется научным работникам, преподавателям и аспирантам, магистрантам, студентам старших курсов, изучающим инженерную геодезию для уникальных сооружений.

Печатается по решению Научно-технического совета Института геодезии и менеджмента ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».

УДК 528.3:621.384

ББК 26.12+22.38

ISBN 978-5-94301-863-3

© Мурзинцев П. П., Полянский А. В.,
Буренков Д. Б., Сердаков Л. Е., 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Добрый день, Уважаемый читатель!

Большое спасибо Вам за интерес, за то что взяли в руки наш скромный труд. Причин для написания этой книжки было несколько. Главная из них заключается в следующем. Читая лекции студентам Сибирского государственного университета геосистем и технологий (НИИГАиК, СГГА), задаю один и тот же вопрос. Чем знаменит наш город Новосибирск, какими основными достопримечательностями располагает? Лишь совсем немногие называют Новосибирский академгородок, точнее Сибирское Отделение Российской академии наук. Про конкретные научно-исследовательские институты и говорить не приходится. Между тем, один из мировых центров изучения физики высоких энергий, элементарных частиц находится именно у нас в Западной Сибири. Это институт ядерной физики имени Будкера ИЯФ СО РАН. Волею судьбы после окончания Новосибирского института геодезии, аэрофотосъемки и картографии по специальности «Прикладная геодезия» в 1982 году и защиты кандидатской диссертации в 1986 году автор этих строк был направлен на стажировку в ИЯФ. Относительно молодой и самоуверенный, думал что удивить меня будет трудно, так как имел опыт работы в области инженерной геодезии; на геодезическом обеспечении строительства и эксплуатации уникальных инженерных сооружений таких как; метромоста через реку Обь, Ленинградской АЭС, Смоленской АЭС, Калининской АЭС, нефтехимических заводов. Ведь прослушав лекции замечательных ученых–корифеев по направлениям прикладной геодезии Конусова Виктора Геннадьевича, Уставича

Георгия Афанасьевича, Ямбаева Харьеса Каюмовича, Резанцева Геннадия Григорьевича, Маркузе Юрия Исидоровича, Мицкевича Валерия Ивановича, Пискунова Матвея Егоровича, Бокова Марка Аркадьевича и многих других не предполагал, что в геодезической группе ИЯФ СО РАН возникают столь специфические задачи производства высокоточных геодезических измерений. Руководитель группы Пупков Юрий Алексеевич, человек с великолепным чувством юмора энциклопедическими знаниями, как в области физики элементарных частиц, так и в области прикладной геодезии и математической обработки результатов измерений поставил задачу разработки методики высокоточного нивелирования в кольце тоннеля ВЭПП-4 со средней квадратической погрешностью не грубее 0.15 мм.

Юрий Алексеевич сказал: «Это должно быть обязательно нивелирование короткими лучами, петле-зигзагообразное, с десятком промежуточных контролей и замыканием общего кольца на наши специально изготовленные нивелирные рейки и шкалы». С одноклассником по группе Левашовым Юрием Ивановичем (сейчас он работает в Стэнфордском университете в США) приступили к решению задачи. Позднее разработанная методика найдет отражение в его кандидатской диссертации (глава 3). Мы, конечно, знали, что в отличие от классической геодезии, когда геодезический центр находится в земле на глубине ниже глубины промерзания, над ним устанавливается геодезический сигнал, в прикладной геодезии, геодезический центр, точнее знак может быть на какой угодно высоте и иметь достаточно странную конструкцию с виртуальным центром-носителем координат. Удивили размеры нивелирных реек 40 см и шкал 5 см, но и даже на них необходимо было выбрать только один штрих, чтобы исключить ошибку фокусирования зрительной трубы. Маг-

ниты в кольце тоннеля подвешены на потолке, приходилось выполнять высокоточные геодезические измерения с помощью мерных жезлов, с применением лестниц и т.п. Все пространственное положение уникального оборудования, включая геодезические знаки изменяется, корректируется. Может быть, трудность научно-исследовательских задач формирует, какую-то удивительную атмосферу творческого поиска и созидания. Знаменитый дух ИЯФа бережно сохраняется и доныне, с помощью круглого стола, придуманного Будкером, когда на научных семинарах, совещаниях, планерках, академик, внимательно слушает лаборанта-стажера, слесаря, понимая, что только общими усилиями создаются уникальные установки, которым нет равных в мире.

Пожалуй, только установка ВЭПП-1, созданная под руководством Будкера Г. А., на которой впервые в мире, было зарегистрировано рассеивание электронов, не потребовала участия инженеров-геодезистов. Однако, с увеличением размеров и мощности энергетических установок возникли задачи по проектированию, изготовлению, установке уникального физического оборудования, мониторингу в процессе эксплуатации, которые не возможно было решить без участия специалистов в области прикладной геодезии. Авторы рады, что принимают участие в решении этих задач и о некоторых методиках выполнения высокоточных геодезических измерений, геодезическом оборудовании, прецизионной установки, контроле геопространственного положения установок ИЯФ СО РАН будет рассказано в этой книге.

ВВЕДЕНИЕ

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 всё большее применение находят в других областях науки. Эффективность проведения научных экспериментов на ускорительно-накопительных комплексах (УНК) во многом зависят от соблюдения требований к точности установки элементов магнитной структуры в проектное положение. Комплексы могут состоять из тысяч единиц оборудования, которые необходимо смонтировать в единое целое с высокой точностью.

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

В Российской Федерации более двадцати пяти лет не создавались ускорительно-накопительные установки большой мощности. Однако в последние годы в этом направлении предприняты крупные шаги. Принято постановление Правительства РФ от 23 декабря 2019 г. № 1777 о строительстве под Новосибирском уникального ускорительно – накопительного комплекса источника синхротронного излучения 4-го поколения, «Центра коллективного пользования сибирского кольцевого источника фотонов (ЦКП «СКИФ»).

Допуски на установку магнитных элементов структуры УНК находятся в диапазоне 0,5–0,1 мм и наблюдается устойчивая тенденция к их повышению. Современные лазерные трекеры позволяют достичь требуемой точности геодезических измерений для обеспечения монтажа оборудования при выполнении необходимых исследований и разработке специальных методик..

В то же время в научно–технической литературе практически отсутствуют рекомендации по эффективному применению лазерных трекеров, не отражаются результаты исследований по максимально достижимой для них точности и факторы влияющие на этот процесс. Вопросы моделирования пространственных геодезических сетей и производства геодезических измерений в программном комплексе Spatial Analyzer не решены.

Таким образом возникает необходимость постановки и решения научной проблемы геодезического обеспечения проектирования, строительства эксплуатации и мониторинга уникального оборудования ускорительно-накопительных комплексов 4–го и последующих поколений с помощью лазерных трекеров. Исследованиям в этой области, разработкам методик геодезического обеспечения создания и эксплуатации УНК с помощью лазерных трекеров, обеспечению монтажа оборудования, пространственному мониторингу, моделированию геодезических измерений в модуле Measurement Simulation программного продукта Spatial Analyzer и посвящена настоящая монография.

1 | ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

1.1 Общие сведения об ускорителях заряженных частиц

Ускорители заряженных частиц – основной источник экспериментальных данных физики высоких энергий. Конструкционно 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 1.2. Радиальным (R) называется положение частиц, лежащих в медианной плоскости оптической структуры. Медианная плоскость для большинства ускорительных комплексов располагается горизонтально. На одном из первых ускорителей ВЭП-1 медианная плоскость располагалась вертикально. [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 среднеквадратичными поперечными размерами σ_r , σ_z и продольным σ_s , рисунок 1.3. Важным параметром любого ускорителя является эммитанс, объем фазового пространства, внутри которого находится 95 % частиц (2σ). Измеряется в мм•мрад [70].

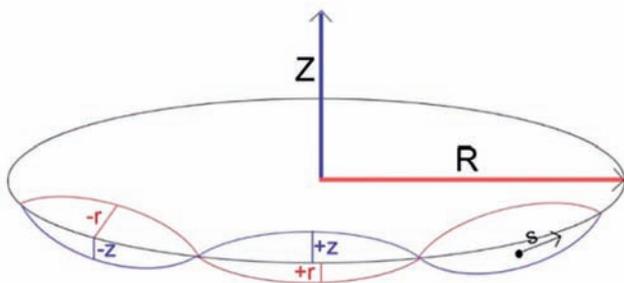


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение движение пучка частиц относительно равновесной орбиты

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 оди-

наковый заряд и разные массы, реализация такого типа коллайдера представляет собой две ускорительных орбиты, пересекающихся в определенных местах, рисунок 1.4.

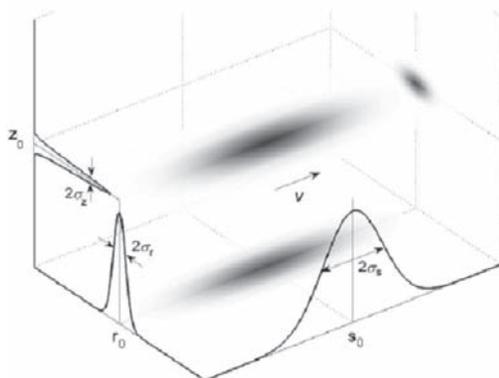


Рисунок 1.3 – Пучок частиц в системе координат равновесной орбиты ускорителя

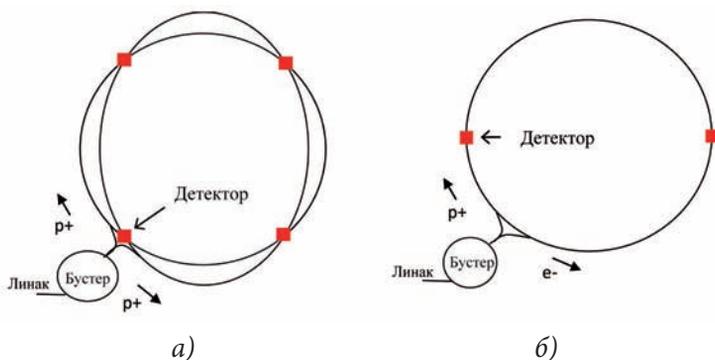


Рисунок 1.4 – Две схемы реализации коллайдеров:
а) встречные протон-протонные или электрон-антипротонные пучки;
б) встречные электрон-позитронные или протон-антипротонные пучки

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.

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 длине дуги $\Delta\theta$ происходит вывод СИ; ψ – угол вертикальной расходимости пучка. Чем больше энергия, тем меньше расходимость перпендикулярно плоскости орбиты, рисунок 1.5 [91].

Источники СИ 4-го поколения, отличаются от своих предшественников малым эммитансом 100–10 пм. В настоя-

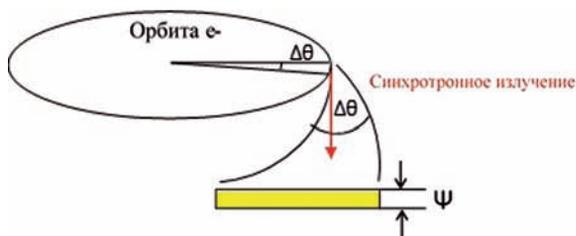


Рисунок 1.5 – Геометрическая интерпретация распределения синхротронного излучения в плоскости орбиты и перпендикулярно ей

щее время функционируют или находятся в стадии запуска несколько таких циклических источников СИ (МАХ-IV – Швеция, EBS-ESRF – Франция, Sirius – Бразилия). К 4-му поколению будет относиться проектируемый СКИФ (Сибирский Кольцевой Источник Фотонов).

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

1.2 Сооружения для размещения ускорителей заряженных частиц и создание современных ускорительно-накопительных комплексов

В мировой практике все старейшие исследовательские ускорительные центры развиваются по определенному сценарию. На площадках с уже существующими ускорителями, выполнившими свою научную программу, создаются новые ускорительные установки. Старые комплексы модернизируются для совместной работы с новыми установками в качестве предускорителей, т.е. по сути формируется новый ускорительный комплекс. Строительство тоннелей и зданий для размещения новых крупных блоков УНК с точки зрения взаимного расположения с уже существующими регламентируется нормами обычными для гражданского строительства [10, 11, 44, 54, 56]. Уточняется взаимное положение крупных блоков ускорительных комплексов в большинстве случаев после окончания строительства тоннелей и проведения их исполнительной съемки. На основании исполнительной съемки проектируются (либо допроектируются) каналы транспортировки пучка (перепускные каналы), которые связывают крупные блоки. Так как каналы транспортировки

имеют возможность корректировать траекторию пучка в достаточно больших пределах, величина погрешности определения взаимного положения ускорителя и предускорителя (бустера) лежит в рекомендуемом практикой диапазоне $\pm 3,0$ мм.

Тоннель для ускорителя является в некотором смысле «футляром», в котором необходимо соблюсти все предусмотренные требования, предъявляемые техническим надзором и безопасностью эксплуатации, к геометрическим параметрам. Строительство же заведомо более просторного тоннеля при возросших протяженностях ускорителей становится экономически не целесообразным. Основные геодезические работы при строительстве тоннелей УНК включают: развитие наземного планового и высотного обоснования; передачу координат и направления в тоннель; развитие подземного планового и высотного обоснования; задание направления на проходку; исполнительную съемку сечений тоннеля. Основной величиной, характеризующей качество работ при проходке тоннелей, является сбойка. Допуски на сбойку указанные нормативными документами по производству маркшейдерских работ составляют 0,2 м в плане и 0,1 м по высоте [61]. При строительстве тоннеля встречными забоями допускается расхождение фактических осей в пределах ± 100 мм [57]. При строительстве тоннелей УНК устанавливаются более жесткие требования к сбойке ± 25 мм, таблица 1.2. Эта величина принимается за предельную погрешность (2σ).

Т а б л и ц а 1.2

Контролируемый параметр	Допуск, мм
Отклонение оси тоннеля от проектного положения	50,0

Контролируемый параметр	Допуск, мм
Максимально допустимая величина погрешности сбойки осей участков тоннеля, сооружаемых встречными забоями	25,0
СКП положения пункта подземной маркшейдерской опорной сети относительно пункта наземной опорной сети	5,0

1.3 Вопросы проектирования 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 (квадрупольей) 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 квадрупольями; 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 1.6.

Существует два основных типа электромагнитов: классический – конструкционно 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.

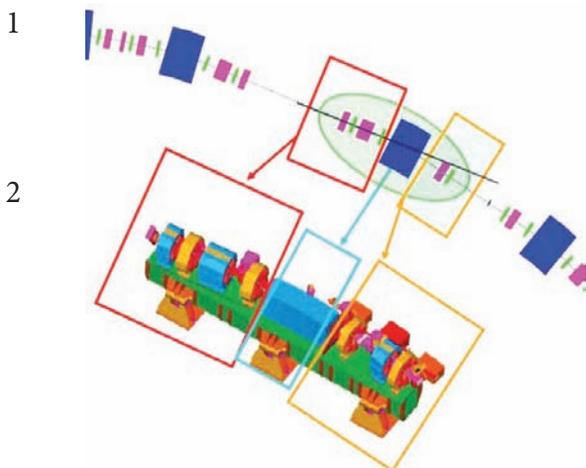


Рисунок 1.6 – Концепция установки группы элементов оптической структуры на примере источника СИ ALBA (Испания):

1 – принятая оптическая структура ускорителя после математического моделирования;

2 – предложенный вариант установки элементов на гирдере

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 1.7.

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.



а)

б)

Рисунок 1.7 – 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

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 ($\epsilon_{к.д.}$). Определяется он по формуле:

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

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

Коэффициент динамичности зависит только от соотношения ω/ρ . На графике, рисунок 1.8, 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 кон-

струкции. При достаточно больших значениях ω/ρ система не успевает реагировать на быстрые изменения высокочастотной возмущающей силы.

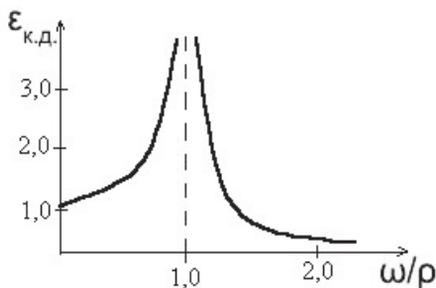


Рисунок 1.8 – График зависимости коэффициента динамичности от соотношения ω/ρ

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

1.4 Допуски на геометрические параметры магнитных систем ускорителей заряженных частиц

С увеличением размеров ускорительных комплексов создавались и модернизировались методики установки технологического оборудования в проектное положение. Параллельно с этим шла непрерывная разработка и модернизация оборудования для производства высокоточных геодезических измерений, а так же разработка методов и средств проверки и калибровки.

Представим магнитный элемент как твердое неделимое тело, расположенное в локальной системе координат. Твердое тело-магнитный элемент, имеет шесть степеней свободы. Три степени свободы - это смещение по каждой из осей ло-

кальной системы координат. Оставшиеся три - это вращения вокруг этих осей.

Изучение динамики заряженных частиц в ускорителях позволило определить, что требования к точности установки магнитной системы должны быть различными по направлениям. Так в поперечных направлениях к орбите допуски более жесткие, чем в направлении вдоль орбиты. Допустимые искажения равновесной орбиты из-за ошибок установки магнитных элементов принимают равными $\sim 1/10$ части апертуры вакуумной камеры. В ускорителях с жесткой фокусировкой эта величина порядка сантиметра, что определяет точность установки магнитных элементов $\sim 0,1$ мм. [49]. Разные магнитные элементы имеют разные требования. В таблице 1.3 приведены обобщенные требования к точности юстировки магнитных элементов ускорительных комплексов.

Следует подчеркнуть, что для каждой конкретной установки требования к точности могут отличаться от приведенных в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Обобщенные допуски на установку магнитных элементов ускорительных комплексов [33].

Элемент	ΔR , мм	ΔZ , мм	ΔQ , мм	α, ω и ψ , мрад
Квадруполь	0,1-0,2	0,2	1,0	0,1
Диполь	1,0	0,2	0,5	0,1
Другие элементы	0,5	0,5	1,0	1,0

Ошибки установки магнитных элементов в проектное положение складываются из:

– погрешности определения положения магнитных осей относительно базовых поверхностей и центров геодезических знаков магнита;

– погрешности юстировки магнитов от знаков геодезической сети;

– погрешности определения координат знаков геодезической сети.

Среднеквадратическое искажение орбиты пропорционально среднеквадратической ошибке установки магнитных элементов:

$$\langle Y \rangle = \gamma \sigma_{уст.} \quad (1.5)$$

Для большинства ускорителей коэффициент искажения орбиты γ лежит в диапазоне 20-50. Задавая допустимую величину $\langle Y \rangle$ и зная γ конкретного ускорителя, формируются требования к $\sigma_{уст.}$. Допуски задаются в виде среднеквадратических отклонений магнитных осей элементов от их проектного (расчетного) пространственного положения, предполагая, что ошибки установки магнитных элементов являются случайными и некоррелированными. Отклонения определяются в единой для комплекса системы координат, которую условно можно назвать абсолютной. При протяженности ускорителей в сотни метров допуски на установку физического оборудования получались близкими к достигнутому на современном этапе уровню точности измерений. Уже при таких сравнительно небольших размерах УНК прецизионная юстировка элементов магнитной структуры является сложной научно-технической задачей. При существенном увеличении размеров УНК до нескольких километров выполнение установленных требований в прежней, абсолютной формулировке, стало практически невозможным. Сформировался

новый подход к заданию допусков на точность выверки физического оборудования ускорителей, основанный на учете корреляции ошибок установки магнитных элементов. Ошибки юстировки магнитных элементов ускорителя эквивалентны появлению возмущений магнитного поля в области, где проходят траектории частиц, приводящих к искажению замкнутой орбиты. В жесткофокусирующих системах, элементы которых точно отъюстированы взаимно, но могут плавно отклоняться от проектного положения на значительную величину (высокие положительные коэффициенты корреляции ошибок юстировки), орбита частиц плавно смещается в ту же сторону и как бы следует за сдвинутыми элементами. [75] При этом влияние ошибок юстировки сглаживается. Те важной с точки зрения динамики частиц является взаимная юстировка соседних магнитов, а не установка их строго в соответствии с проектом. Требования к точности установки могут быть значительно снижены. При этом следует рассматривать искажения орбиты не относительно абсолютной системы координат, а относительно центров самих элементов, которые, в свою очередь, могут быть смещены, рисунок 1.9.

Предложенный подход сформировал разработку специального метода юстировки оборудования ускорителей, основанного на применении сглаживающих кривых [30,82]. Сущность метода заключается в том, что элементы ускорителя юстируются не относительно их проектного (расчетного) положения, а относительно некоторой трендовой кривой, наилучшим образом аппроксимирующей реальное (измеренное) пространственное положение элементов магнитной структуры. Корректируется положение только тех элементов, отклонение которых от сглаживающей кривой выходит за рамки допусков на точность взаимной установки. Применение данного метода для юстировки оборудования ускорителей

телей позволяет решить проблему согласования абсолютной и взаимной точностей и дает возможность существенно сократить объем соответствующих геодезических работ.

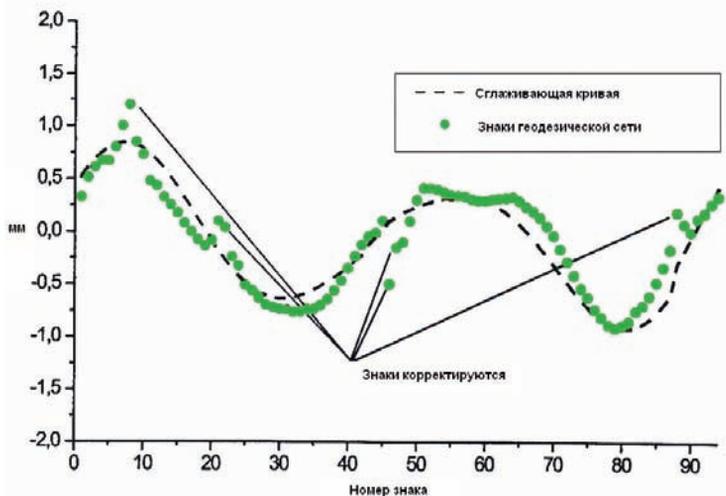


Рисунок 1.9 – Сглаживающая кривая на примере геодезической сети ВЭПП-4М

1.5 Геодезическое оборудование для юстировки магнитных элементов первых ускорителей

Установка оборудования в проектное положение на первых ускорителях малых размеров производилась с использованием средств измерений машиностроения – линейки, штангенциркули, уровни и т. п. С увеличением масштаба комплексов были привлечены специалисты, методики и средства измерения из инженерной геодезии [15, 17 – 19, 35 – 37, 43, 81]. Но точности, реализуемые в инженерно-геодезических работах (например, подземные выработки добычи полезных ископаемых, метро – и мостостроительство),

оказались недостаточными. Потребовалось создание новых методик и приборов для геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорителей, что способствовало дальнейшему развитию инженерной геодезии как науки [31, 32, 47, 49, 55, 58, 68].

Отсутствие специальных высокоточных приборов и вычислительной техники накладывало ограничение на специальные геодезические сети установок. Они должны были быть по возможности простыми, что в свою очередь накладывало геометрические ограничения при проектировании установок. Например, геодезическая сеть протонного синхротрона на 28 ГэВ, расположенного в CERN (период строительства 1954–1959 г), состояла всего из девяти геодезических знаков и представляла собой восьмиугольник с центральной опорной точкой. Для обеспечения возможности геодезических измерений по этой схеме, при проектировании тоннеля кроме самого кольца, периметром около 650 м, пришлось закладывать строительство четырех диаметральных тоннелей длиной по 200 м каждый, что существенно увеличило стоимость установки еще на этапе строительства. Геодезия того времени опиралась в основном на угловые измерения. В качестве основного прибора для производства измерений использовался теодолит. Для выполнения геодезических работ на протонном синхротроне использовались высокоточные теодолиты Вильд Т-3. Вильд Т-3 – оптический теодолит высокой точности с микрометром на плоскопараллельных пластинах.

Достоинством микрометра с плоскопараллельными пластинками является его компактность и достаточно высокая точность измерений. Однако ему присущи и недостатки: микрометр имеет мертвый ход; он достаточно сложен в изготовлении (погрешности изготовления его узлов обуслов-

ливают наличие систематических ошибок, хотя и малых по величине, но обязательно учитываемых при высокоточных измерениях).

Каждый, теодолит используемый на протонном синхротроне в CERNе был оборудован жестким центриром в виде шара диаметром 30 мм, а также снабжен специальной визирной целью, расположенной над осью вращения теодолита. Для достижения требуемой точности необходимо было выполнить многократные повторения геодезических измерений на каждой станции. Так при выполнении 16 приемов, погрешность азимутального смещения опорных точек восьмиугольника по отношению к центру, составила 0,166 мм для расстояния 105 м [85].

С течением времени в ускорительной физике происходило формирование более четких критериев по точности позиционирования оборудования – переход от абсолютной точности к локальной. Предложен и реализован метод сглаживания, описанный в 1.4 [33, 34, 54].

Методика высокоточных геодезических измерений инварными проволоками.

Для высокоточных измерения расстояний использовались инварные проволоки (ленты). Инвар – сплав никеля и железа, основным достоинством которого является практически нулевой коэффициент линейного расширения, что в свою очередь позволило минимизировать поправку за температуру материала в результатах геодезических измерений. Суть метода измерений состояла в том, что инварная проволока (лента), натянутая с одним постоянным усилием имеет один определенный размер. Размер измерялся на шкалах, закрепленных на концах проволоки, при помощи микроскопов. Длина каждой проволоки определялась на оптическом

компараторе сравнением со вторичными эталонами длины из государственного реестра. Позже в компараторах стали использоваться стационарные интерферометры.

После запуска протонного синхротрона в 1959 году было принято решение отказаться от угловых измерений в пользу линейных. Вместо измерения углов стали измерять восемь радиальных расстояний. Точность единичного определения длины составляет $\pm 0,015$ мм. Использование только линейных измерений позволило на порядок увеличить точность определения координат знаков опорной геодезической сети по сравнению с сетью, где использовались линейно-угловые измерения [85].

В начале шестидесятых годов развитие вычислительной техники дало новый толчок в развитии геодезии на ускорительных комплексах. Стали разрабатываться компьютерные программы для обработки и уравнивания результатов геодезических измерений. Это в свою очередь сильно повлияло на проектирование и создание новых ускорительных комплексов. При проектировании новых установок полностью отказались от радиальных тоннелей. Опорные сети установок стали представлять собой вытянутые цепочки геодезических четырехугольников.

Дистинвар – геодезический прибор, для измерения расстояний, разработанный в CERN в 1962 году, рисунок 1.10 [78, 83]. Принцип работы – с помощью микрометра фиксировалось положение каретки с закрепленным на ней балансиром. К одному концу балансира прикреплена инварная проволока к другому груз создающий натяжение. На каретке закреплена скоба с двумя контактными штырьками, между которыми находится балансир. Прикосновение балансира к любому из штырьков включает привод мотора перемещения каретки. Каретка перемещается до тех пор, пока балансир не

встанет строго между штырьками, обеспечив тем самым, оптимальное натяжение 15 кг для инварной проволоки. После этого берется отсчет по микрометру.



Рисунок 1.10 – Дистинвар

При работе с дистинваром, также как и при работе с инварными проволоками, требовалось проводить калибровку на оптической скамье, впоследствии на компараторе при помощи интерферометра. Дистинвар повысил скорость выполнения геодезических работ на ускорителях. Впоследствии был разработан полностью автоматический прибор с возможностью дистанционного управления и получения информации прямо на компьютер [75, 84]. Прибор показал высокую эффективность при длительных наблюдениях за деформациями, при выполнении работ в радиационно-опасных помещениях, при наблюдении за деформациями в работающих установках.

В качестве недостатка можно отметить, что для каждого конкретного расстояния требуется своя отдельная проволока.

Высокоточный уровеньный динамомат (ВУД).

Высокоточный уровеньный динамомат ВУД конструкции Голубцова А. И. – устройство для измерения длины линии, разработан в 1971 году [9, 40]. В качестве мерного тела применялись инварные проволоки. В ИЯФ СО РАН высокоточный уровеньный динамомат был модернизирован. Вместо инварных проволок был изготовлен комплект инварных рулеток с перфорированными отверстиями. Это сделало прибор универсальным. На рисунках 1.11, 1.12 представлен ВУД, с обозначением его компонентов.



Рисунок 1.11 – Общий вид ВУДа:

- 1 – посадочный цилиндр диаметра 25,4 мм; 2 – каретка;*
- 3 – отсчетное устройство микрометра;*
- 4 – груз противовес весом 15 кг; 5 – нож; 6 – обойма с шариком;*
- 7 – лента рулетки с перфорированными отверстиями;*
- 8 – рычаг; 9 – 20" уровень; 10 – вкладыш со штифтом и прижимной планкой.*

ВУД обеспечивает постоянную силу натяжения для мерного тела, в данном случае, ленты, и имеет посадочный ци-

цилиндр 1, для принудительного центрирования на геодезическом знаке, подвижную часть (каретка) 2 и отсчетное устройство (микрометр) 3. Расположенные на каретке груз 4, нож 5 и шариковый упор для обоймы 6, которым оканчивается рулетка 7, образуют аналитические весы. При перемещении каретки упор удерживается рулеткой и остается неподвижным, а груз начинает приподниматься. Усилие, прикладываемое к каретке, передается на рулетку. Величина этого усилия пропорциональна высоте, на которую приподнялся груз или, что одно и то же, углу наклона рычага 8, на котором этот груз закреплен. Величина наклона рычага контролируется уровнем 9 с ценой деления 20".

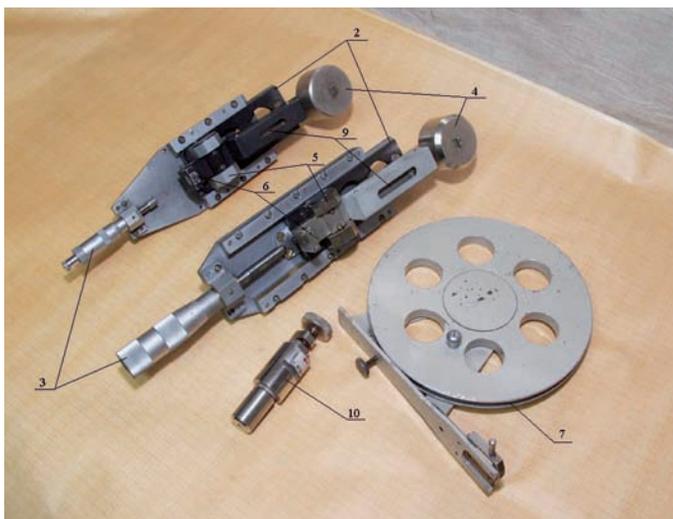


Рисунок 1.12 – Компоненты ВУДа

Если при измерениях перемещением каретки выводить уровень в нуль-пункт с точностью одного деления, то к рулетке будет приложено одинаковое усилие, точностью порядка 1 г. Величина перемещения каретки измеряется вин-

том микрометра 3. При одинаковой длине рулетки разность величин перемещения каретки, при измерении расстояний между пунктами для одного и того же отверстия, будет равна разности этих расстояний. При калибровке определяется, какому расстоянию соответствует отсчет «ноль» по микрометру ВУДа для рабочего отверстия. Поэтому, при измерении в тоннеле, для этого отверстия разность перемещения каретки равна отсчету по микрометру.

Натяжение проволоки (рулетки) производится вращением микрометричного винта, который одновременно является отсчетным. Он упирается опорным шариком в каретку ВУДа, толкает ее и заставляет приподниматься рычаг с грузиком. На винт в направлении его продольной оси прикладывается нагрузка в 10 (15) кг, что не корректно с метрологической точки зрения, так как применяемые микрометричные винты не приспособлены нести такую осевую нагрузку. Диапазон измерения винта равен 25 мм. Длина линии вычисляется по формуле [37, 66]

$$L = L_0 + (a - a_0) + \Delta t, \quad (1.6)$$

где L_0 – расстояние между посадочными цилиндрами при компарировании;

a_0 – отсчет по микрометричному винту во время измерений;

a – отсчет по микрометричному винту во время эталонирования прибора;

Δt – поправка за температуру.

Рулетка представляет собой инварную ленту, сечением 8x0,4 мм. Вдоль продольной оси всей ленты пробиты точные отверстия диаметром 2 мм. Выбранным отверстием лента фиксируется на штифте вкладыша 10, также имеющего посадочный цилиндр для принудительного центрирования. По-

сле легкого натяжения в сторону ВУДа лента прижимается винтом через прокладку к телу вкладыша, и это разгружает при ее натяжении штифт и реперное отверстие.

Если соседние пункты расположены на разной высоте, то при измерении расстояния между ними высокоточным уровнем динамометром усилие, прикладываемое к рычагу, будет содержать вертикальную составляющую, направление которой зависит от того, на каком из знаков установлен ВУД. Соответственно, горизонтальное усилие на мерное тело будет больше или меньше номинального (прикладываемого к мерному телу при калибровке), что дает ошибку в измерении. Чтобы устранить этот недостаток, расстояние измеряется в прямом и обратном направлении и затем вычисляется среднее значение.

Измерительные инварные жезлы.

Измерительный жезл представляет собой инварный стержень, на концах которого закреплены вкладыш и микрометр, рисунок 1.13. Торцевое тело микрометра отполировано и расположен параллельно оси вкладыша, а мерное тело ми-



Рисунок 1.13 – Измерительные инварные жезлы

кромметра – параллельно оси инварного стержня. Инвар выбран в качестве материала из-за низкого коэффициента линейного расширения, что практически исключает влияние температуры на результаты геодезических измерений.

С помощью инварных жезлов измеряют высоты в треугольниках и трапециях в опорных вытянутых сетях полигонометрии на ускорительных комплексах и производят установку оборудования в проектное положение.

Для измерений применяется нихромовая струна диаметром 0,2 мм и два стандартных вкладыша с фиксаторами струны. Перед работой с инварными жезлами требуется их метрологическая аттестация (компарирование). Аттестация выполняется при помощи лазерного интерферометра на компараторе ИЯФ СО РАН.

1.6 Геодезические работы при производстве и монтаже элементов структуры отечественных ускорительных комплексов.

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 1.14. 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.

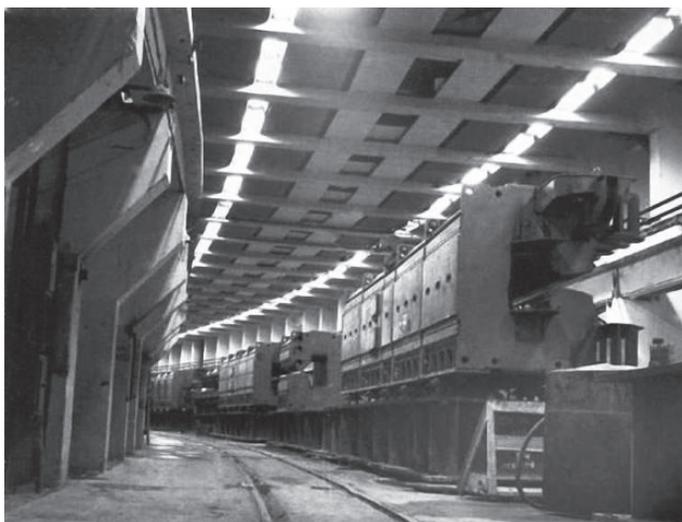


Рисунок 1.14 – Монтаж электромагнитов в тоннеле ускорителя У-70

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 крупномасштабных 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 микрометричные 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 МИИГАиК. Основой для монтажа элементов является специальная геодезическая сеть. Магнитная структура располагается над пунктами 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 трекары заменяют большинство старой инструментальной базы. Заметно сокращаются временные затраты на производство геодезических работ в периоды профилактических остановок комплексов.

2 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ УНК

2.1 Основные задачи специальных геодезических сетей УНК и их виды

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 строитель-

стве 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, перепад высот 720 м. Невязка составила 2,1 мм [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 пере-

дачи координат зависят сбойка тоннеля и отклонения оси тоннеля от проекта [13, 29, 32, 58].

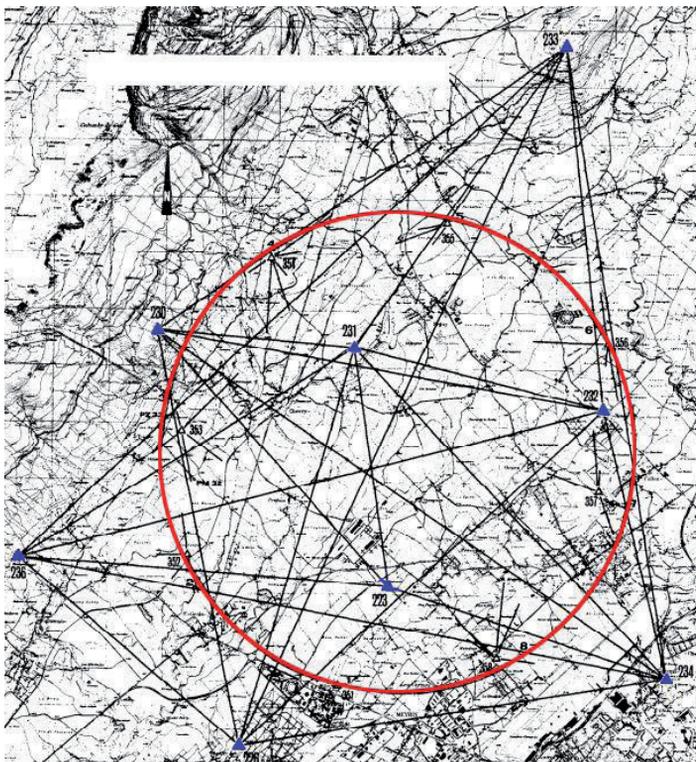


Рисунок 1.15 – Плановая геодезическая сеть ускорителя LEP

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 проек-

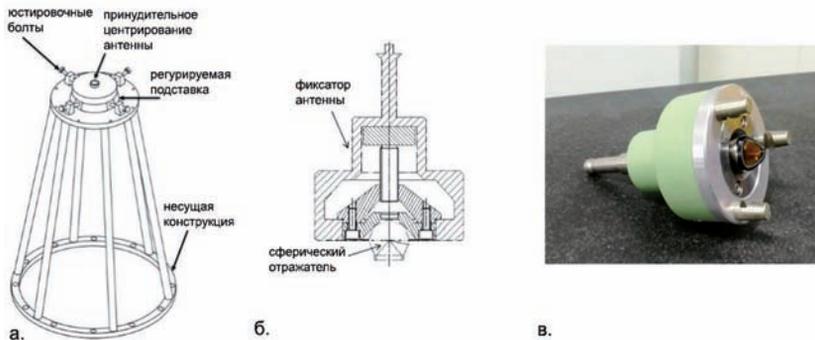


Рисунок 1.16 – Конструкция крепления спутникового оборудования для передачи координат с наземной сети в сеть ускорителя (а) и фиксатор антенны с посадочным метом под сферический отражатель лазерного трекера (б, в)

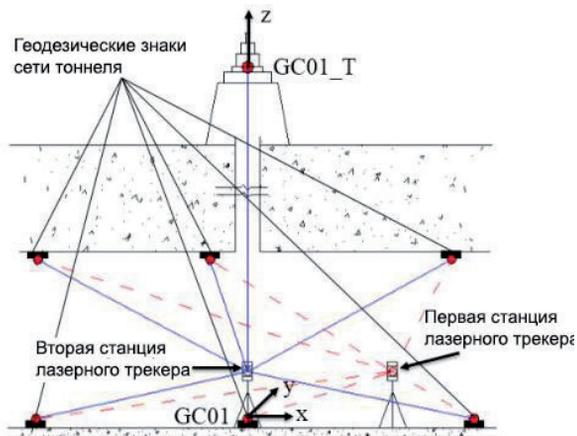


Рисунок 1.17 – Схема измерений при передаче координат лазерным трекером в сети ускорительного комплекса CSNS

тирования 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.

Соосность цетров 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.

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].

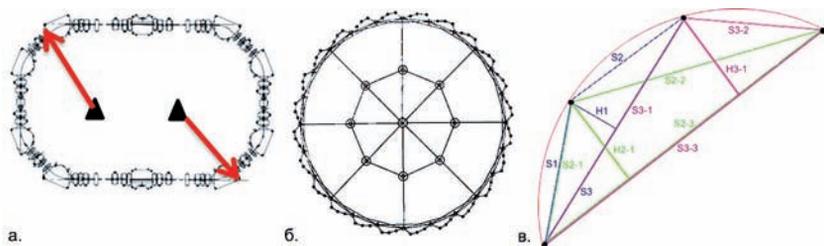
В центральной геодезической сети все радиальные измерения производились от одного или двух знаков. Такие системы получили распространение для сравнительно небольших ускорителей [5]. В радиально-кольцевой сети измерения геодезических знаков производились в два этапа. С центрального знака по радиальным 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.

Требования на установку в проектное положение при монтаже и периодической юстировке оборудования в про-



*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*

цессе 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 раздельных 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.

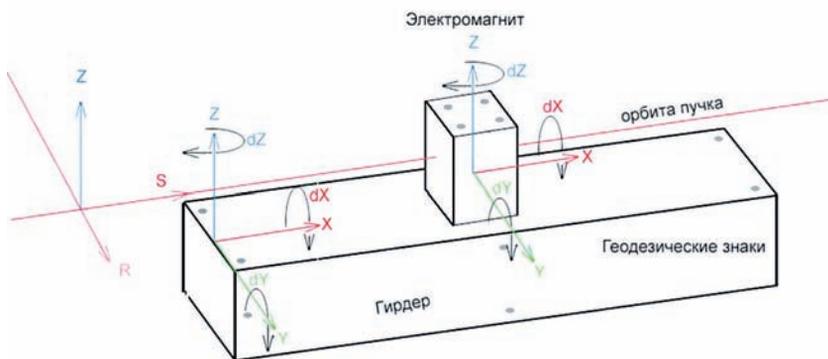


Рисунок 1.19 – Контролируемые шесть параметров (смещения вдоль X , Y , Z и вращения вокруг dX , dY , dZ осей системы координат) элемента оптической структуры ускорителя и гирдерного модуля в общей системе координат комплекса

При монтаже современных ускорительно-накопительных комплексов, где геодезический контроль проводят с применением лазерных трекеров, руководствуются допусками на поперечные и продольные смещения. Для установки физического оборудования в тоннеле с требуемыми допусками необходимо соблюдение влияния внешних условий при проведении измерений (термостабилизация помещения, отсутствие боковой рефракции и т. п.) [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. 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.

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, чтобы максимально охватить территорию будущего комплекса [75, 79].

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

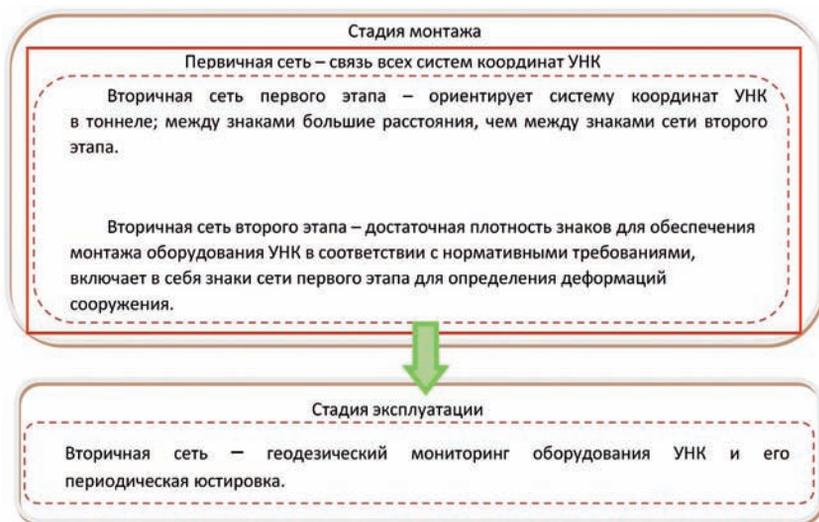


Рисунок 1.20 – Схема развития геодезических сетей в жизненном цикле ускорительно-накопительного комплекса

Первичные геодезические сети ускорительных комплексов имеют ряд характерных особенностей [12]:

- сети создаются в условной системе координат с привязкой к городской системе координат;
- форма сети определяется обслуживаемой территорией и формой объектов, группы объектов;
- к пунктам сети предъявляются повышенные требования по стабильности положения в условиях их эксплуатации.

Проектирование наземного и подземного геодезического обоснования при строительстве тоннеля УНК и програм-

мы измерений должно проводиться для каждого отдельного случая строительства в зависимости от:

- конструктивных особенностей ускорителя;
- топографо-геодезической изученности района работ;
- геологических условий участка работ;
- наличия приборов и оборудования.

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].

Вторичные опорные сети характеризуются:

- большой плотностью пунктов сети;
- пункты сети стараются приблизить к устанавливаемому оборудованию;
- форма сети обычно повторяет геометрическую форму сооружения в плане.

При построении вторичных опорных геодезических сетей кольцевых ускорителей важно учитывать особенности структуры конкретной магнитной системы – ее спектральную чувствительность. Т.е. проводить сравнительный анализ спектрального состава ошибок определения координат пунктов вторичной сети и спектральной чувствительности структуры ускорителя. Что позволяет еще на этапе проектирования определить наиболее оптимальный вариант построения вторичной геодезической сети.

В качестве примера создания опорных геодезических сетей современного ускорительного комплекса рассмотрим комплекс NSLS-II Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Ускорительный комплекс NSLS-II включает в

себя: источник излучения – накопительное кольцо электронных пучков периметром ~ 780 м, электронный синхротрон (бустер) периметром 158 м, первоначальный линейный ускоритель [71-73, 83]. Геодезическая сеть NSLS-II построена по принципу трех ступеней. Схема комплекса NSLS-II и его первичной опорной геодезической сети представлена на рисунке 1.21 [47].

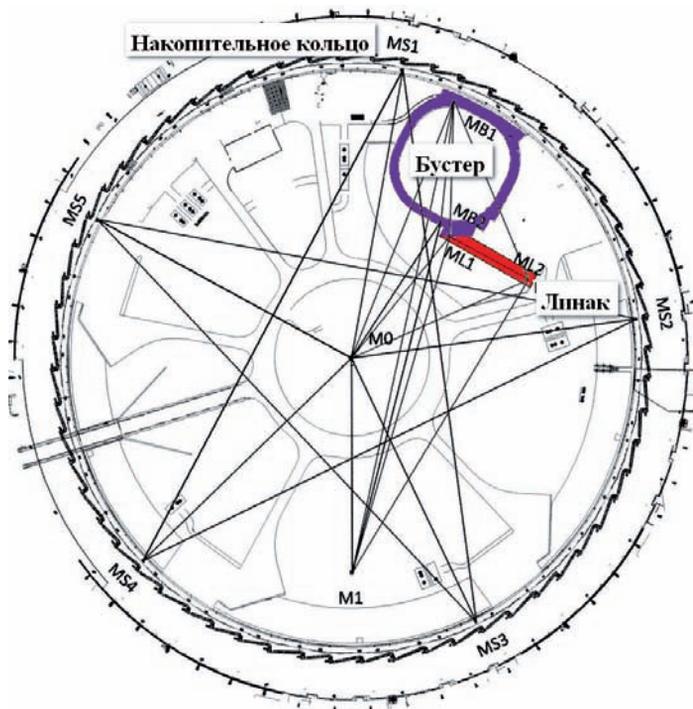


Рисунок 1.21 – Схема первичной опорной геодезической сети комплекса NSLS-II

Вторичная опорная геодезическая сеть, от которой производится установка элементов бустера, включает в себя 36

напольных и 72 настенных знаков, расположенных по всему периметру. Вид сверху показан на рисунке 1.22.

Пространственное положение геодезических знаков вторичной сети бустера определяется измерениями лазерным



Рисунок 1.22 – Вторичная опорная геодезическая сеть бустера NSLS-II

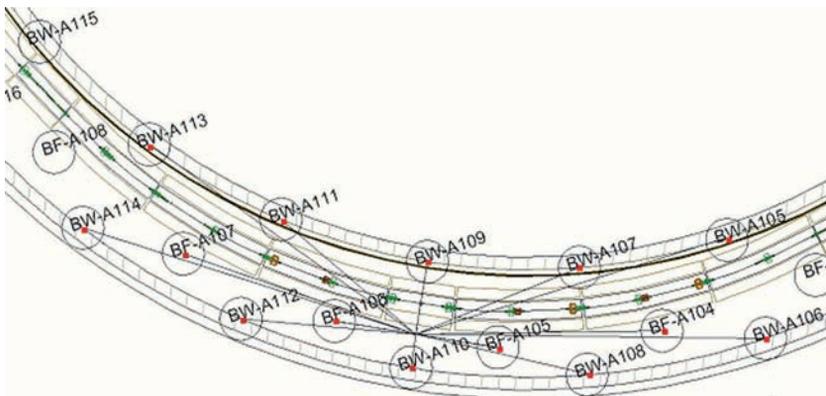


Рисунок 1.23 – Схема измерений на станции лазерным трекером

трекером с 36 станций. Схема измерений на одной станции показана на рисунке 1.23. Главная особенность расположения знаков вторичной геодезической сети бустера заключается в том, что знаки размещены по всему объему сечения тоннеля кроме потолка. То есть это по сути линейно-угловая объемная геодезическая сеть. Такой вид сети в настоящее время характерен для всех ускорителей, где для геодезического сопровождения монтажа и юстировки применяются лазерные трекары.

Структура геодезической сети источника СИ ESRF (Европейский Синхротронный Центр, Франция, Гренобль) 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 спут-

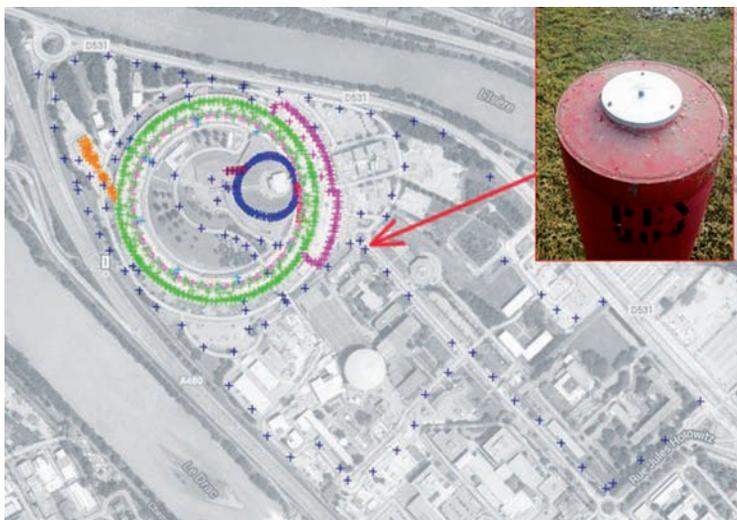


Рисунок 1.24 – Первичная сеть Европейского синхротронного центра и геодезический знак

никового оборудования, а высотное – цифровыми нивелирами. Первичная сеть источника СИ ESRF представлена на рисунке 1.24.

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 1.25.

Схема сети измерений лазерным трекером усложняется отсутствием широких проемов для передачи координат от

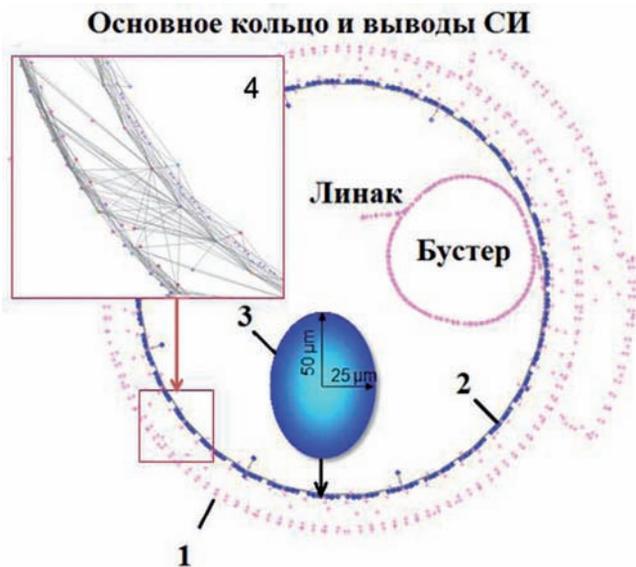


Рисунок 1.25 – Вторичная геодезическая сеть источника СИ ESRF:

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

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.

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. 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 1.26.

В соответствии с каталогом координат гирдер устанавливают в проектное положение. Предварительная установка



Рисунок 1.26 – Установленные опорные конструкции гирдера относительно вынесенной линии оси

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.

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, ее описание дано в 1.4.

С 1993 г. в ESRF 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 уровненной 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.

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]. Геодезической группой 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 1.27.

Каждая плоскость преобразована в поверхность для дальнейшего экспорта в САД-программы. В таблице 1.4 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.

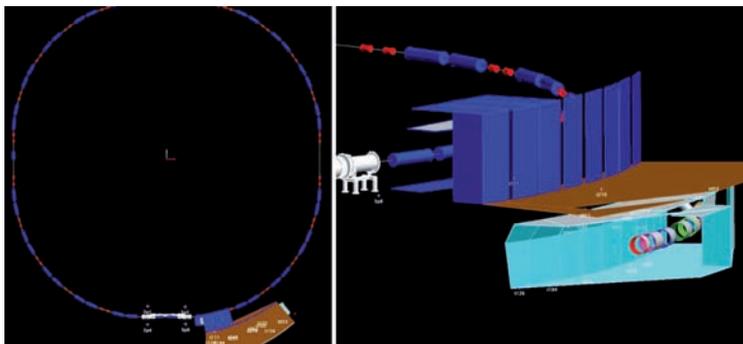


Рисунок 1.27 – Трехмерная модель области проектируемого канала транспортировки Бустер-Нуклотрон

Таблица 1.4

Наименование измерений	Величина СКП, мм
Связь съемки и СК бустера	0,3
СКП опорной сети канала Бустер-Нуклотрон	0,04
Бетонные конструкции	50
Ярмо Синхрофазатрона	3
Оси криостатов Нуклотрона	0,1

2.2 Методика комплексного подхода к геодезическому обеспечению жизненного цикла УНК

Анализ опыта создания ускорительных комплексов дает понимание о необходимости применения комплексного подхода к геодезическому обеспечению этого процесса, так как

нарушение технологической преемственности от этапа к этапу в создании УНК создает необоснованные трудозатраты и соответственно требует дополнительных ресурсов для восстановления той или иной достоверной технической информации.

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 состав-



Рисунок 1.28 - Структурная схема геодезического обеспечения этапов создания УНК с учётом технологических связей

ляющую. А также выявить технологические связи и определить порядок взаимодействия. Схема геодезического обеспечения этапов создания УНК с учётом технологических связей представлена на рисунке 1.28.

Процессы реализуются в единой для всех составных частей УНК системе координат. Геодезическое обеспечение стадий создания УНК формируется на основе анализа исходных данных и принятых технических решений. Их состав представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1

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.

Ста- дии	Исходные данные	Технические решения	Геодезическая составляющая
Изготовление	<p>1 Точности, заложен- ные в техническом задании.</p> <p>2 Каталог координат узловых точек орби- ты пучка.</p>	<p>1 Конструкция стапелей и каре- ток для магнит- ных измерений адаптированная для геодезиче- ского контроля.</p>	<p>1 Создание опорных сетей стапелей.</p> <p>2 Определение взаимного положе- ния геодезических знаков и узловых точек магнитной оси элементов.</p> <p>3 Создание каталога координат геодези- ческих знаков маг- нитных элементов.</p> <p>4 Геодезический кон- троль изготовления гирдеров модулей.</p>
Монтаж	<p>1 Каталог координат геодезических знаков магнитных элемен- тов.</p> <p>2 Проект размеще- ния и компоновки физического обо- рудования в тоннеле ускорителя.</p>	<p>1 Количество и расположение геодезических знаков опорной сети в тоннеле ускорителя.</p> <p>2 Технология сборки модулей.</p>	<p>1 Создание опорной геодезической сети в тоннеле ускорителя.</p> <p>2 Геодезическое обеспечение сборки модулей.</p> <p>3 Геодезическое обе- спечение монтажа модулей в тоннеле.</p>
Эксплуатация	<p>1 Каталог координат геодезических знаков магнитных элемен- тов.</p> <p>2 Каталог координат геодезических знаков опорной сети в тон- неле ускорителя.</p> <p>3 Реальные условия и компоновка радиа- ционной защиты.</p>	<p>1 Оптимизация схем измерений в геодезической опорной сети.</p>	<p>1 Геодезический мониторинг.</p> <p>2 Юстировка маг- нитных элементов ускорителя.</p>

Таким образом, в создании современных ускорительно-накопительных комплексов можно выделить две главные тенденции;

– строительство ускорителей заряженных частиц, путем модернизации, уже действующих с объединением в единый комплекс с вновь, строящимися установками;

– строительство источников синхротронного излучения 4-го и последующих поколений с «нуля».

При реализации каждого из указанных, вариантов в задачи геодезического обеспечения должен быть положен комплексный подход и заложены в конструкции специальных геодезических сетей возможности оказания помощи при ремонте, реконструкции монтаже существующего технологического оборудования и его последующего обновления на перспективный срок эксплуатации. Необходимо предусмотреть эффективное применение лазерных трекеров уже на этапе проектирования, для успешной эксплуатации и геопространственного мониторинга уникального физического оборудования, тоннеля и инженерных сооружения УНК.

3 ЛАЗЕРНЫЕ ТРЕКЕРЫ – ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

3.1 Лазерный трекер API Laser Tracker

API Laser Tracker – высокотехнологичный, высокоточный измерительный прибор, основанный на принципе слежения за специальным уголкового отражателем с помощью лазерного луча, рисунок 2.1 [73]. При попадании лазерного луча, испускаемого прибором, в центр уголкового отражателя, он возвращается обратно в объектив прибора, а далее – на приемный датчик дальномера [39]. С учетом двух углов и расстояния вычисляются текущие пространственные координаты отражателя. Координаты можно получать как в статическом режиме, так и в динамике. API Laser Tracker оснащен двумя типами дальномеров: интерферометром и абсолютным дальномером. Их основное отличие состоит в том, что абсолютный дальномер измеряет абсолютное расстояние между отражателем и прибором, а интерферометр, в свою очередь измеряет изменение расстояния от некоего базового значения. На неподвижной части прибора закреплено посадочное место под отражатель «домашняя точка» (англ. Home position). Во время инициализации прибор начинает работу с «домашней точки». Так же она задает направление оси X системы координат трекера.



Рисунок 2.1 – Общий вид API Laser Tracker 3

Технические характеристики [74]:

- максимальная скорость бокового смещения объекта: $> 3,0$ м/с ($120''/\text{sec}$);
- максимальное ускорение во всех направлениях: > 2 g;
- измерительный диапазон по горизонтали: $640^\circ (\pm 320^\circ)$;
- измерительный диапазон по вертикали: $+ 80^\circ$ до $- 60^\circ$;
- диаметр измерения. (IFM и ADM): > 120 м;
- угловое разрешение: $\pm 0,07$ арк-секунд;
- точность внутреннего уровня: ± 2 арк-секунд.

Точность объемных измерений:

- разрешение: 1 мкм;
- повторяемость: 2,5 ppm (2 sigma).

Абсолютная погрешность определения 3-мерных координат:

- статическая: ± 5 ppm (2 sigma) ($25 \mu\text{m}$) на 5 м;
- динамическая: ± 10 ppm (2 sigma) ($50 \mu\text{m}$) на 5 м.

Характеристики лазерного интерферометра по дальности:

- разрешение 1 мкм;
- точность лучше чем 1,0 ppm.

Характеристики дальномера ADM:

- разрешение: 1 мкм;
- точность: ± 15 мкм; $\pm 0,0006''$ (15 мкм) на 5 м; $\pm 0,0012''$ (30 мкм) на 20 м.

Условия окружающей среды:

- температура воздуха от минус 10 °С до > 40 °С;
- барометрическое давление 580 мм рт. ст. - 800 мм рт.ст.;
- относительная влажность 10–92,5 % без конденсата;
- высота 2000 м.

Физические характеристики:

- вес головки трекера: 8,5 кг;
- вес контроллера: 3,2 кг;
- вес всего комплекта: 23 кг.

3.2 Координатно-измерительная система фирмы Leica. Лазерный трекер АТ 403

Лазерный трекер АТ 403 является моделью из серии мобильных координатно-измерительных систем Leica, рисунок 2.2. В отличие от АРІ не имеет «домашней точки», инициализация происходит на отражатель установленный в 3 метрах от инструмента.



Рисунок 2.2 – Общий вид Leica AT 403

Технические характеристики [62]:

- Точность измерения абсолютной дальности: ± 10 мкм;
- Точность измерения абсолютного угла (включая ориентацию по силе тяжести): ± 15 мкм + 6 мкм/м;
- Защита от пыли и влаги: IP54;
- Рабочая температура: от $- 15$ °С до $+ 45$ °С;
- Относительная влажность: не более 95% (без образования конденсата);
- Типовой объем измерения с отражателем (\emptyset) 320 м;
- Минимальное расстояние при измерении расстояния с отражателем: $< 0,8$ м;
- Встроенное Литий-ионный аккумулятор со стандартным временем работы: 8 часов.

3.3 Точность определения координат лазерным трекером (специфика использования на ускорителях)

При эксплуатации лазерных трекеров необходимо учитывать особенности их применения как с точки зрения принципа измерения, так и конструктивных решений в конкретной модели трекера. Отсутствие возможности центрирования прибора на геодезическом пункте не позволяет реализовывать традиционные схемы измерений. Методом определения координат при измерениях лазерным трекером является полярный метод – пространственная полярная засечка. При этом измеряются горизонтальные β , вертикальные ν углы и наклонные расстояния S до отражателя, установленного на поверхности объекта.

Координаты центра отражателя:

$$X_{\text{отп}} = S \cos \nu \cos \beta ; \quad (2.1)$$

$$Y_{\text{отп}} = S \cos \nu \sin \beta ; \quad (2.2)$$

$$Z_{omp} = S \sin \nu; \quad (2.3)$$

Погрешности определения координат центра отражателя:

$$m_{X_{omp}} = \sqrt{(\cos \nu \cos \beta)^2 m_S^2 + (S \cos \nu \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 + (S \sin \nu \cos \beta)^2 \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2}; \quad (2.4)$$

$$m_{Y_{omp}} = \sqrt{(\cos \nu \sin \beta)^2 m_S^2 + (S \cos \nu \cos \beta)^2 \left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 + (S \sin \nu \sin \beta)^2 \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2}; \quad (2.5)$$

$$m_{Z_{omp}} = \sqrt{(\sin \nu)^2 m_S^2 + (S \cos \nu)^2 \left(\frac{m_\nu}{\rho}\right)^2}, \quad (2.6)$$

где m_S , m_β , m_ν соответственно, погрешности определения наклонного расстояния, горизонтального угла и вертикального угла.

В большинстве измерительных систем, реализующих полярный метод, точность измерения расстояний (погрешность вдоль визирного луча) и угла (погрешность поперек визирного луча) различна. Выбирая наиболее рациональное расположение прибора относительно обмеряемого объекта, необходимо анализировать множество факторов: требование к точности, реальные условия измерений и особенности конструкции объекта.

3.4 Влияние продолжительности внутренней термостабилизации прибора на точность измерений

Лазерный трекер, как и любой электронный прибор имеет внутри части подверженные нагреву. Нагрев в свою очередь может приводить к деформациям составных частей и корпуса прибора. Исследования в данной области являются

актуальными. Зарубежные ученые геодезисты выполнили ряд исследований для трекеров FARO и Leica [71,82, 93, 96].

Проведено исследование в определении влияния времени прогрева API Laser Tracker 3 на точность геодезических измерений. Лазерный трекер был установлен на геодезический знак компаратора ИЯФ СО РАН. Геодезический знак для которого определялись координаты, находится на расстоянии 19,647 м от трекера. В течении четырех с половиной часов, с периодичностью одна минута, проводилось определение координат геодезического знака относительно трекера. Во время одного измерения прибор выполнял 50 отсчетов в последствии вычислял среднее арифметическое значение.

$$X_{\text{изм}} = \frac{\sum (\cos\alpha * \sin\beta * S)}{50}, \quad (2.7)$$

$$Y_{\text{изм}} = \frac{\sum (\sin\alpha * \sin\beta * S)}{50}, \quad (2.8)$$

$$Z_{\text{изм}} = \frac{\sum (\cos\beta * S)}{50}. \quad (2.9)$$

Средняя квадратическая погрешность одного измерения для расстояния 19,642 м составило 0,037 мм и вычислялось по формулам:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (((\cos\alpha * \sin\beta * S)_i - X_{\text{изм}})^2 + ((\sin\alpha * \sin\beta * S)_i - Y_{\text{изм}})^2 + ((\cos\beta * S)_i - Z_{\text{изм}})^2)}{50}}. \quad (2.10)$$

При проведении измерений в помещении отсутствовали люди, прибор работал в автоматическом режиме. Температура за весь промежуток времени оставалась постоянной. Для того чтобы избежать вертикального температурного градиента свет в помещении был выключен. Всего сделано семь циклов измерений. Типичный результат измерений представлен на рисунках 2.3, 2.4, 2.5 в локальной системе коор-

динат, где ось X параллельна направлению на измеряемый геодезический знак.

Анализ графика на рисунке 2.3 показал, что изменение координаты X измеряемого геодезического знака составляет около 0,06 мм для расстояния 19,642 м. Ось X параллельна направлению луча лазера API Laser Tracker 3. Виден резкий скачок на первых 15 минутах после прогрева.

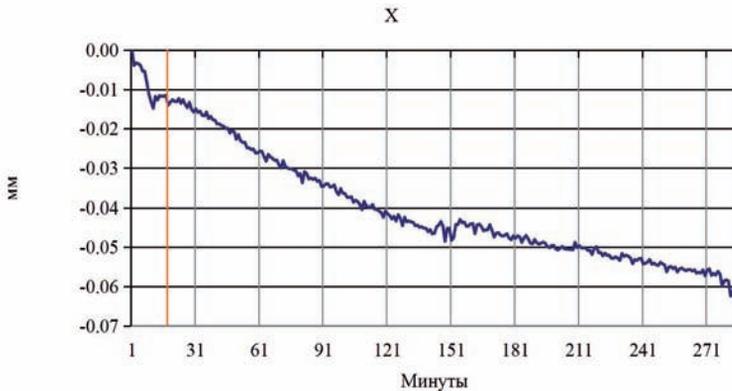


Рисунок 2.3 – Изменение координаты X

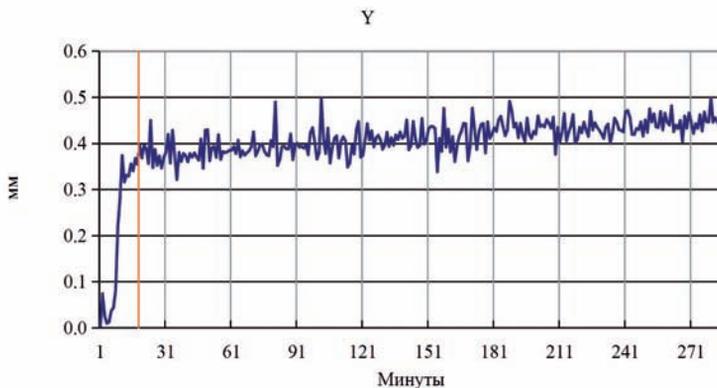


Рисунок 2.4 – Изменение координаты Y

Изменение положения определяемого геодезического знака по оси Y соответствует изменению положения горизонтального круга API Laser Tracker 3, рисунок 2.3. Так же как и на графике рисунка 2.4 виден резкий скачок на первых 15 минутах, но его величина больше почти на порядок. После 15 минут измерений положение определяемого геодезического знака изменяется в пределах 0,08–0,09 мм за четыре с половиной часа.

График на рисунке 2.5 показывает изменение положения вертикального круга API Laser Tracker 3. Так же отмечается скачок на первых 15 минутах работы, затем следует плавное увеличение высоты определяемого геодезического знака на величину 0,8 мм.

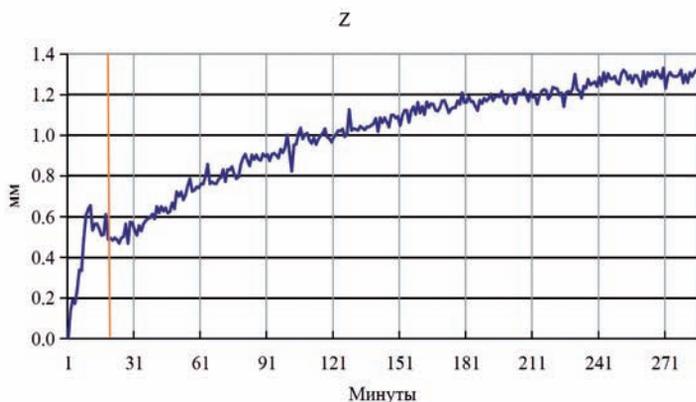


Рисунок 2.5 – Изменение координаты Z

Изменение положения определяемого геодезического знака по показаниям прибора, возможно, объясняется постепенным прогревом основания прибора. Было выполнено дополнительное исследование в котором API Laser Tracker 3 автоматически определял координаты трех геодезических знаков в течении шести часов. Взаимное положение трех то-

чек оставалось неизменным, при этом высота самого дальнего от трекера знака по показаниям прибора изменилась на 0,7 мм и совпала с приведенным графиком на рисунке 2.5. Это дает основание рассматривать данное изменение как перемещение системы координат прибора вызванной тепловой деформацией корпуса. Стоит отметить, что изменение координаты Z после 5 часов прогрева становится пренебрежительно мало. Результаты измерений проведенных API Laser Tracker 3 показывают, что для корректной работы после стандартного прогрева требуется выдерживать минимум 15-20 минут только после этого начинать калибровки и измерения. В противном случае все выполненные калибровки приходится на временной интервал, когда происходит скачок приведенный, на графиках, что не дает уверенности в точности последующих измерений [22]. Целесообразно высокоточные работы выполнять в короткий промежуток времени, делать контрольные измерения на опорные геодезические знаки, при необходимости производить повторные привязки к опорной геодезической сети.

3.5 Исследование точности линейных измерений API Laser Tracker 3

API Laser Tracker 3 оснащен двумя типами дальномеров: интерферометром (IFM) и абсолютным дальномером (ADM). Их основное отличие состоит в том, что ADM измеряет абсолютное расстояние между отражателем и прибором. IFM в свою очередь измеряет изменение расстояния от некого базового значения. Была проведена серия измерений на компараторе ИЯФ СО РАН для определения относительной точности API Laser Tracker 3. В качестве эталона взят интерферометр Hewlett-Packard 5529A, рисунок 2.6. Технические характеристики [23, 70]:

- предел измеряемой длины $S=80$ м;
- дискретность отсчета 0,1 (0,01) мкм;
- относительная погрешность измерений $0,5 \cdot S$ мкм;
- допустимая скорость перемещения 18 м/мин.



Рисунок 2.6 – Интерферометр Hewlett-Packard 5529A

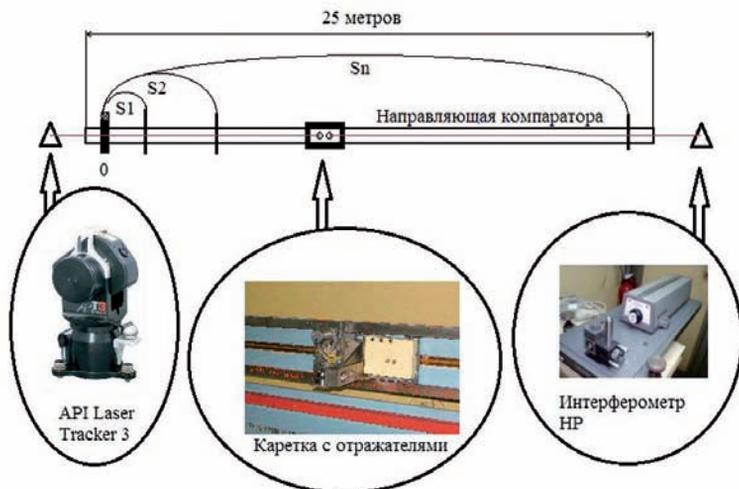


Рисунок 2.7 – Схема расположения оборудования на компараторе ИЯФ СО РАН

Для совместных измерений длин линий, API Laser Tracker 3 установили на противоположном конце направляющей компаратора в створ с интерферометром НР 5529А, рисунок 2.7.

Для выполнения исследований была модернизирована каретка интерферометра. На ней, с обратной стороны от призмы интерферометра, установлен отражатель трекера, рисунок 2.8. Каретка с двумя отражателями позволяла выполнять измерения лазерным трекером и интерферометром одновременно.

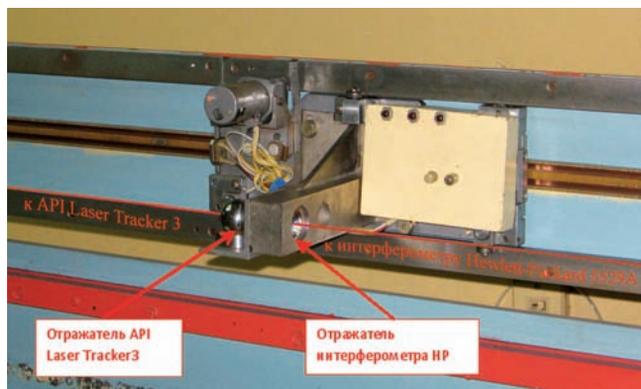


Рисунок 2.8 – Каретка с двумя отражателями

Выполнено несколько циклов измерений: в режиме IFM на длину ~ 25 м с шагом 3 м, в режиме ADM: на длину ~ 25 м с шагом 3 м; на длину 10 м с шагом 0,5 м; на длину ~ 25 м с шагом 0,5 м [26].

Каретка с отражателями перемещалась по команде оператора с помощью электропривода, размещенного на ней. Измерения выполнялись одновременно двумя приборами после остановки каретки. Для координирования положения каретки API Laser Tracker 3 выполнял от 50 до 100 отсчетов при каждой остановке каретки, показания по интерферо-

метру записывались вручную. Для контроля в нескольких циклах делался обратный ход каретки, при котором так же выполнялось координирование ее положения. За начало отсчета брались координаты положения каретки, ближайшие к API Laser Tracker 3. Расстояния для API Laser Tracker 3 вычислялись по формуле

$$S_{API} = \sqrt{\begin{aligned} &(((\cos\alpha * \sin\beta * S)_0 - (\cos\alpha * \sin\beta * S)_n)^2 + \\ &((\sin\alpha * \sin\beta * S)_0 - (\sin\alpha * \sin\beta * S)_n)^2 + \\ &((\cos\beta * S)_0 - (\cos\beta * S)_n)^2) \end{aligned}} \quad (2.11)$$

Для интерферометра HP 5529A начальное положение каретки было взято за ноль и дальнейшее вычисление расстояний производилось по формуле

$$S_{HP} = X_0 - X_n \quad (2.12)$$

На рисунке 2.9 представлены разницы длин линий, полученных лазерным трекером и интерферометром HP.

$$\Delta = S_{HP} - S_{API} \quad (2.13)$$

Во время проведения измерений API Laser Tracker 3 работал в режиме интерферометра.

Первое и последнее измерение произведено в 2,5 м от трекера. Не замыкание прямого и обратного хода составило 4 мкм, величина, удовлетворяющая паспортным требованиям прибора на этом расстоянии. На расстоянии 24 м. максимальная разница с интерферометром составила 16 мкм, что так же хорошо укладывается в заявленные характеристики производителя.

Следует отметить, что все измерения производились в не термостатированном помещении. Перепад температур на длине направляющей компаратора достигал 1,5 °С. Так же добиться точной установки измеряющей головки трекара в створ с интерферометром НР является сложной задачей. Поэтому, в измерения включены, пусть и не значительные измерения угломеров прибора, влияющие на общую точность полученных данных.

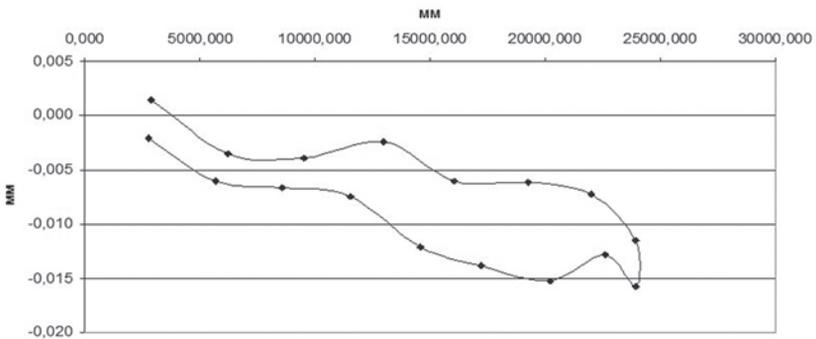


Рисунок 2.9 – Разность расстояний, измеренных API Laser Tracker 3, в режиме IFM с интерферометром НР

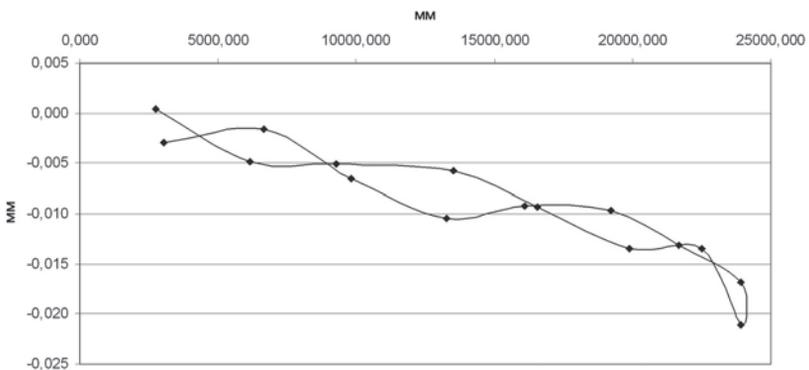


Рисунок 2.10 – Разность расстояний, измеренных API Laser Tracker 3, в режиме ADM с интерферометром НР

Сравнение ADM режима с интерферометром является наиболее важным этапом исследования, так как большинство измерений производится в этом режиме. Измерения производились для расстояний 10 и 24 м. На рисунке 2.10 показана разность измеренных расстояний API Laser Tracker 3 в режиме ADM с интерферометром HP для расстояния 24 м.

Полученные данные укладываются в погрешности абсолютного дальномера, указанные в паспорте прибора. Так на 24 м разница с интерферометром составила около 22 мкм, при допустимых 30 мкм.

На основе произведенных измерений можно сделать вывод: интерферометр и абсолютный дальномер API Laser Tracker 3 соответствуют паспортным характеристикам производителя. Измерения предпочтительнее производить в режиме IFM для достижения лучшей точности.

Исследование точности линейных измерений при работе в двух режимах.

Для исследований API Laser Tracker 3 был установлен на штативе в створ с интерферометром, но на разной высоте.

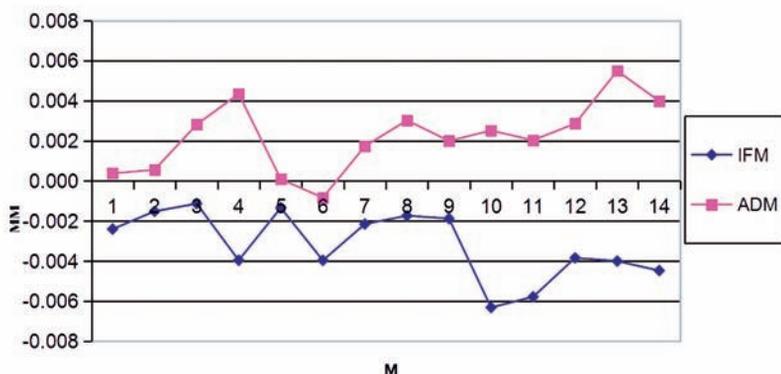


Рисунок 2.11 – Разность расстояний измеренных API Laser Tracker 3 в двух режимах с интерферометром HP 5529A

На перемещающуюся каретку закреплено два отражателя (по одному для каждого из приборов). Каретка перемещалась при помощи электродвигателя, при остановке, одновременно снимались показания по двум приборам. При одном измерении API Laser Tracker 3 выполнял 50 отсчетов. Вычислялось среднее значение. Сделано по 15 измерений в двух режимах работы API Tracker'a (IFM, ADM). Расстояние между остановками каретки около 1 м. Пройдено расстояние примерно 14 м. Результат исследований представлен на рисунке 2.11.

Разность расстояний между интерферометром и API Laser Tracker 3 в режиме интерферометра составляет 0,006 мм, в режиме абсолютного дальномера 0,007 мм для расстояния в 14 м. Это соответствует техническим характеристикам прибора.

Исследование точности линейных измерений в ADM режиме с прерыванием луча.

Большинство измерений выполняемых при помощи лазерного трекера проходят в режиме ADM. Это означает, что лазерный луч многократно прерывается. Для проверки повторяемости измерений было выполнено соответствующее исследование.

Прибор установлен на тумбе компаратора. Определяются координаты геодезического знака на расстоянии 3,7 м. Прибор работает в режиме ADM. Измерения выполнялись при двух кругах. При одном измерении брали 100 отсчетов. Затем луч прерывали. Отражателем находили луч снова. Проводили следующее измерение. Выполнено десять измерений.

Результаты геодезических измерений:

$$\sigma X = 0,012 \text{ мм};$$

$$\sigma Y = 0,019 \text{ мм};$$

$$\sigma Z = 0,014 \text{ мм}.$$

Такое же количество измерений в тех же условиях выполнено для расстояния 13,2 м. Результаты:

$$\sigma X = 0,054 \text{ мм};$$

$$\sigma Y = 0,035 \text{ мм};$$

$$\sigma Z = 0,034 \text{ мм}.$$

3.6 Исследование работы внутреннего электронного уровня API Laser Tracker 3

Согласно приведенным техническим характеристикам, точность горизонтирования прибора по внутреннему электронному уровню составляет $\pm 2''$. Электронный уровень работает в диапазоне $\pm 1^\circ$. При выполнении работ с помощью API Laser Tracker 3 на комплексах ИЯФ СО РАН была замечена ошибка определения превышений между измеренными точками с разных станций прибора [24, 25]. Эта ошибка никак не укладывалась в величину $\pm 2''$. Чувствительности уровня, закрепленного на штативе, оказалась недостаточно, хотя он обеспечивал необходимую работу электронного уровня (компенсатора), диапазон которого контролируется программно.

Для определения величины этой ошибки был поставлен следующий эксперимент. API Laser Tracker 3, был установлен на экзаменатор, который в свою очередь, установили на жестком основании, между двумя геодезическими знаками, закрепленными на компараторе ИЯФ.

Экзаменатор – представляет собой поверочную плиту, имеющая три точки опоры, с возможностью изменения горизонта $\pm 1^\circ$.

Геодезические знаки конструкции Лебедева Н. Н. и усовершенствованные в ИЯФ СО РАН представляют собой шлифованную площадку с дюймовым отверстием, выпол-

ненным с точностью $+ 0.009$ мм, рисунок 2.12. Знаки закреплены на бетонных колоннах, не связанных со зданием.

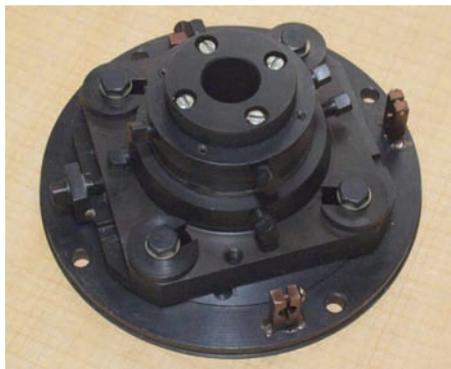


Рисунок 2.12 – Геодезический знак

Для модернизации прибора была изготовлена специальная площадка с прижимными и юстировочными винтами. В ней поместили уровень с ценой деления $6'$ и закреплен в ручке API Laser Tracker 3 на оси вращения горизонтального круга, рисунок 2.13.

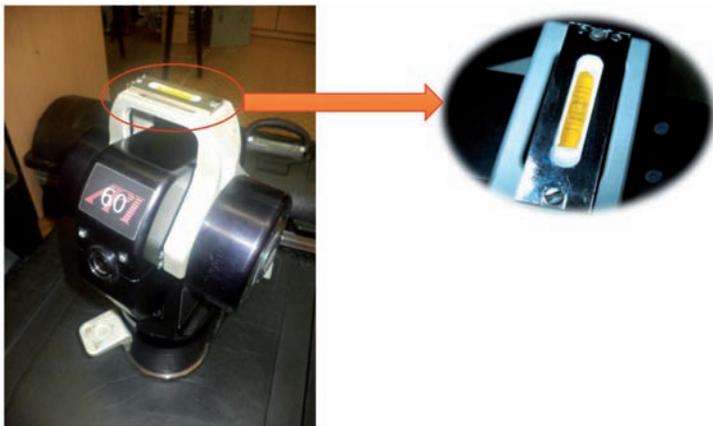


Рисунок 2.13 – Изготовленный уровень на корпусе прибора

Методика поверки: экзаменатор установлен параллельно измеряемой линии. Угол наклона экзаменатора измеряется при помощи оптического квадранта (точность измерения 30"). На компараторе установлены два знака на расстоянии 16,5 м друг от друга. API Laser Tracker 3 расположен на экзаменаторе между ними. «Домашняя точка» API Laser Tracker 3 направлена перпендикулярно измеряемой линии, соответственно ось X системы координат, приведенного к уровню API Laser Tracker 3, перпендикулярна измеряемой линии. Был проверен диапазон наклона оси Y на $\pm 1^\circ$ с шагом 5', при этом ось X была горизонтальна, установлена по уровню, закрепленному на оси вращения API Laser Tracker 3. Наклон осуществлялся только по одной оси.

Перед измерением были выполнены все необходимые поверки API Laser Tracker 3.

В начале измерений API Laser Tracker 3 установлен на экзаменаторе под углом - 60', приведен к электронному уровню, выполнено измерение контрольных точек (трижды), вычислено превышение. Далее угол наклона экзаменатора

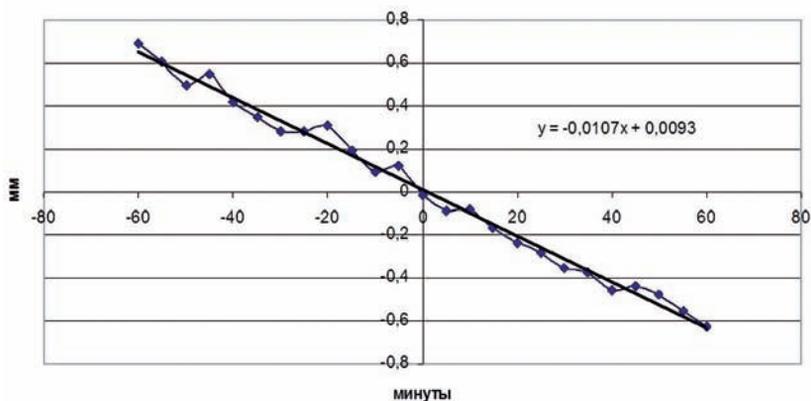


Рисунок 2.14 – График величины ошибки измерения превышений API Laser Tracker 3 с наклоном экзаменатора по оси X

изменялся на 5', прибор приводился к электронному уровню, повторялось измерение (трижды). Был пройден диапазон от минус 60' до плюс 60'. Результат представлен на графике рисунка 2.14. Среднее квадратическое отклонение от трендовой прямой 0,038 мм. Превышение между контрольными точками 0,125 мм измерено при помощи нивелира Ni 007, вычтено из превышений, измеренных API Laser Tracker 3.

Выполнен повторный цикл измерений с повторным включением и инициализацией инструмента. «Домашняя точка» была развернута на 90°. Результат представлен на графике рисунка 2.15. Среднее квадратическое отклонение от трендовой прямой 0,035 мм. Превышение между контрольными точками 0,151 мм измерено при помощи нивелира Ni 007, также вычтено из превышений, измеренных API Laser Tracker 3.

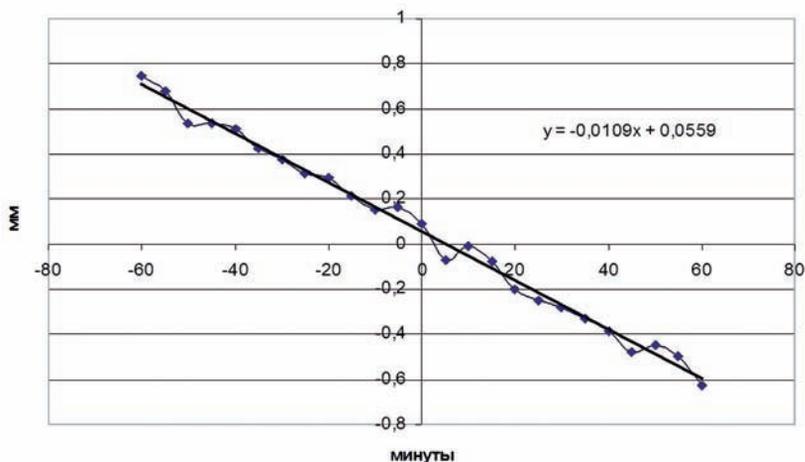


Рисунок 2.15 – График величины ошибки измерения превышений API Laser Tracker 3 при наклоне экзаменатора по оси Y

Средняя квадратическая погрешность взятия отсчета API Laser Tracker 3 составила 0,011 мм.

Анализ результатов исследований представленных на графиках показал, что прибор имеет систематическую ошибку по внутреннему электронному уровню (компенсатору) порядка 9"-10" по обеим осям. Это оказалось больше заявленной точности почти в пять раз.

После проведения исследований разработчик прибора (американская фирма API) был поставлен в известность. С их стороны предпринято несколько попыток исправить ситуацию. В конечном итоге выяснилось, что данная ошибка присутствует во всех приборах этой серии. Исправить ее производитель не смог. Из инструкции прибора была убрана информация о диапазоне работы внутреннего электронного уровня.

Сотрудники института ядерной физики СО РАН предприняли усилия для исправления данной ситуации. Исследована точность постановки прибора по изготовленному уровню, размещенному в ручке API Laser Tracker 3. Исследование проводилось следующим образом. С помощью экзаменатора API Laser Tracker 3 был установлен по уровню, закрепленному в ручке прибора. Затем API Laser Tracker 3 устанавливался по внутреннему электронному уровню, производилось измерение контрольных точек (трижды), после этого API Laser Tracker 3 случайным образом наклоняется, и процедура установки и измерения повторялась. Было выполнено по 10 повторных установок прибора для трех разных расстояний:

для расстояния 4,137 м, $\sigma = 0,009$ мм;

для расстояния 14,875 м, $\sigma = 0,037$ мм;

для расстояния 24,556 м, $\sigma = 0,051$ мм.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что для корректного использования прибора необходимо

иметь примерно 6' уровень, закрепленный на ручке прибора, на оси вращения горизонтального круга. Модернизация API Laser Tracker 3 позволила достичь точности определения отклонений от горизонта 0,5", что в четыре раза лучше точности заявленной заводом изготовителем.

3.7 Исследования точности по внутренней сходимости лазерных трекеров API RADIAN и Leica AT 400-й серии

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]:

$$m_L = 7 \cdot 10^{-4} \cdot L_{(M)}, \quad (2.14)$$

$$m_B = m_V = 1 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L_{(M)}, \quad (2.15)$$

где m_L – погрешность измерения расстояний в режиме абсолютного дальномера; m_β , m_v – 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]:

$$m_\beta = m_v = 15 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} \cdot L_{(M)}. \quad (2.16)$$

Для удобства оценки повторяемости каждого измерения создается своя система координат. Начало системы координат – пересечение вертикальной и горизонтальной осей инструмента. Ось X ориентирована 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

$$m_{\text{отр}} = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 + m_Z^2} = \sqrt{m_L^2 + m_\beta^2 + m_v^2}, \quad (2.17)$$

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:

$$m_{L,\beta,\nu} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n-1}}, \quad (2.18)$$

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 2.16.

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.

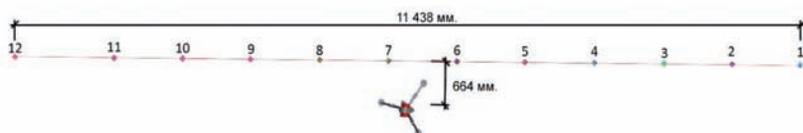


Рисунок 2.16 – Схема положения сферического отражателя, измеряемого лазерным трекером API RADIAN, на направляющей компаратора ИЯФ СО РАН

На рисунке 2.17 приведены значения среднеквадратических погрешностей результатов измерений [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.

Максимальное превышение между точками 4-5 1235 мм. Схема расположения мест установки сферического отражателя

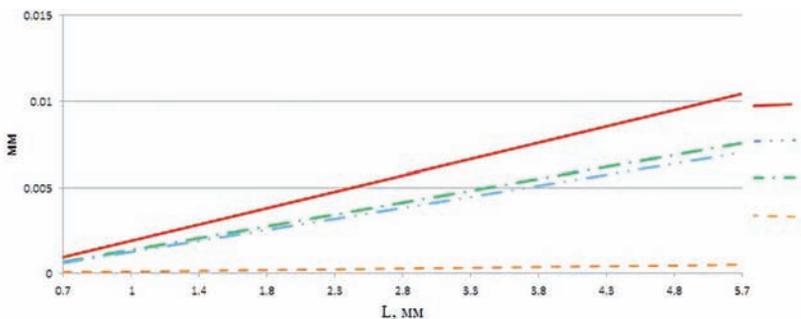


Рисунок 2.17 – График зависимости погрешностей лазерного трекера API RADIAN от расстояния

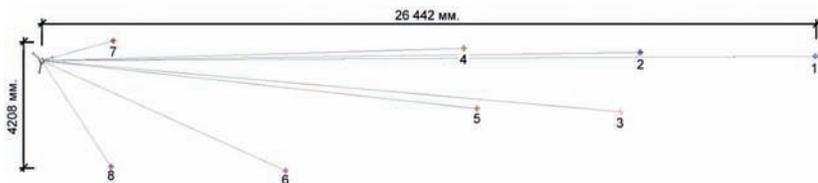


Рисунок 2.18 – Схема расположения сферического отражателя при проведении измерений лазерными трекерами Leica

теля относительно лазерного трекера приведена на рисунке 2.18.

На рисунках 2.19, 2.20 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

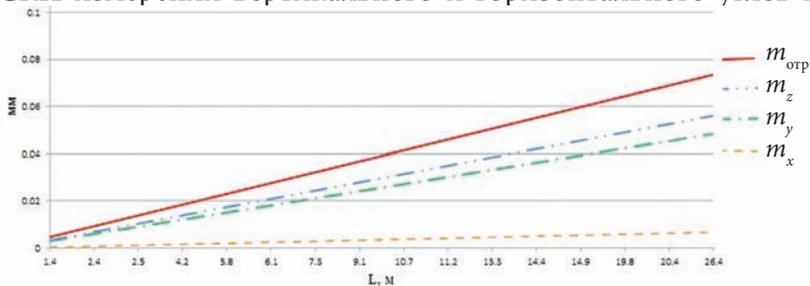


Рисунок 2.19 – График зависимости погрешностей лазерного трекера Leica AT401 от расстояния

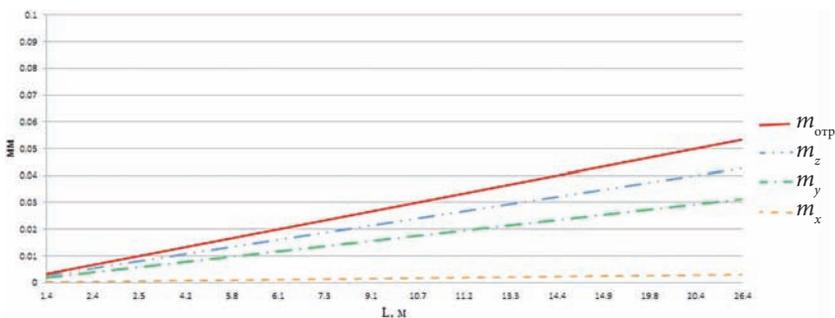


Рисунок 2.20 – График зависимости погрешностей лазерного трекера Leica AT403 от расстояния

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.

3.8 Исследования точности измерений API Laser Tracker 3 на координатно-измерительной машине Contura G2

В качестве эталонного измерительного оборудования использовалась координатно-измерительная машина Contura G2. Предельно допустимая погрешность в соответствии с ISO10360 линейного измерения при температуре окружающей среды от 18 °С до 22 °С составляет 1,9 мкм + L/300, где L – это измеренная длина в миллиметрах [86]. Помещение, в котором проходили измерения, было термостабилизировано, поддерживалась температура 21 °С. Для проверки точности измерений API Laser Tracker 3, было выполнено определение пространственного положения 10 геодезических знаков, закрепленных на плите координатно-измерительной машины Contura G2. Эти 10 геодезических знаков представляют собой подставки под 1,5 дюймовый отражатель для API Laser Tracker 3, рисунок 2.21. Сфера отражателя устанавливается на них на три точки и фиксируется магнитом. Магнит при этом отражателя не касается. Максимальное расстояние между геодезическими знаками 1,75 м. Сам лазерный трекер так же закреплялся на плите.

Были произведены измерения в режиме интерферометра и в режиме абсолютного дальномера с шести станций трекера при. Перед измерениями выполнены необходимые проверки и калибровки.

Порядок измерений. При установке отражателя на геодезический знак, производилось 50 отсчетов API Laser Tracker 3, в это же время координатно-измерительная машина Contura G2 измеряла сферу отражателя, набирая от 20 до 30 точек на ее поверхности. Данные для трекера усредняются, для коор-



Рисунок 2.21 – Геодезические знаки, закрепленные на плите

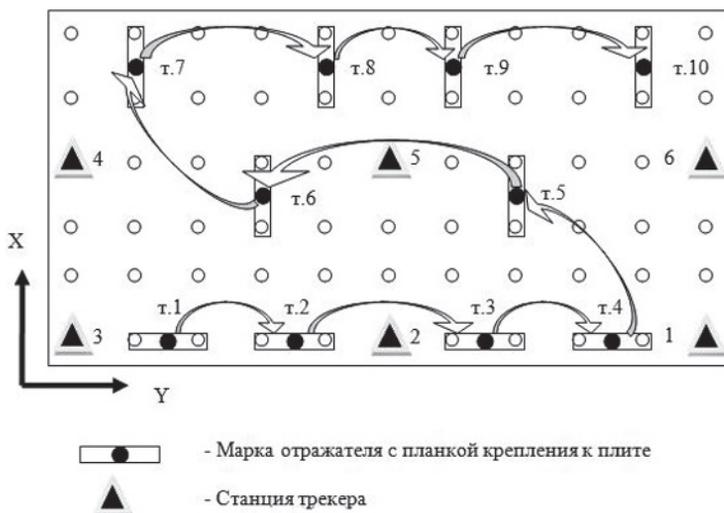


Рисунок 2.22 – Схема расположения оборудования

динатно-измерительной машины вычисляются координаты центра сферы.

После этого отражатель перемещался на следующий геодезический знак, и процедура повторялась, рисунок 2.22. На все геодезические знаки отражатель устанавливался единообразно, нанесенным на бленде номером вверх.

В таблице 2.1 приведены средние значения результатов геодезических измерений со средним квадратическим отклонением для Contura G2 из шести измерений.

Таблица 2.1 – Средние значения результатов измерений координатно-измерительной машины Contura G2.

На- звание точки	Среднее значе- ние по X(мм)	СКП по оси X(мм)	Среднее значение по Y(мм)	СКП по оси Y(мм)	Среднее значе- ние по Z(мм)	СКП по оси Z(мм)
т.1	0,002	0,002	-0,0011	0,001	-0,0018	0,002
т.2	-1,693	0,000	400,3370	0,001	-0,0333	0,001
т.3	-0,884	0,001	1000,8808	0,002	-0,0496	0,002
т.4	-0,002	0,002	1399,5634	0,002	-0,0028	0,002
т.5	498,893	0,001	1099,6157	0,002	0,0963	0,001
т.6	497,966	0,001	301,2572	0,001	0,0169	0,001
т.7	899,667	0,000	-98,4910	0,003	0,1239	0,001
т.8	899,720	0,001	501,1332	0,001	0,0425	0,001
т.9	899,138	0,001	900,5067	0,001	0,0304	0,001
т.10	898,104	0,001	1500,8890	0,001	-0,0006	0,000

Средние квадратические погрешности определения координат из шести измерений на координатно-измерительной машине Contura G2 соответствуют паспортным значениям.

В таблице 2.2 приведены средние значения результаты измерений API Laser Tracker 3. Прибор работал в режиме ин-

терферометра (IFM). То есть луч лазера за все время проведения измерений ни разу не прерывался.

Таблица 2.2 – Средние значения результатов измерений API Laser Tracker 3 в режиме IFM.

На- звание точки	Среднее значе- ние по X(мм)	СКП по оси X(мм)	Среднее значение по Y(мм)	СКП по оси Y(мм)	Среднее значе- ние по Z(мм)	СКП по оси Z(мм)
т.1	0,000	0,009	0,0000	0,008	0,0000	0,007
т.2	-1,693	0,007	400,3473	0,006	-0,0338	0,005
т.3	-0,885	0,006	1000,9065	0,006	-0,0501	0,005
т.4	0,000	0,006	1399,5986	0,010	0,0000	0,007
т.5	498,912	0,005	1099,6397	0,007	0,0892	0,005
т.6	497,987	0,007	301,2624	0,009	0,0082	0,005
т.7	899,691	0,011	-98,4987	0,011	0,1238	0,007
т.8	899,750	0,008	501,1385	0,003	0,0356	0,004
т.9	899,167	0,007	900,5234	0,006	0,0216	0,005
т.10	898,137	0,007	1500,9183	0,009	0,0000	0,009

Среднее квадратическое отклонение от Contura G2:

$$\sigma_x = 0,012 \text{ мм};$$

$$\sigma_y = 0,014 \text{ мм};$$

$$\sigma_z = 0,004 \text{ мм}.$$

В таблице 2.3 приведены средние значения результатов измерений API Laser Tracker 3. Прибор работал в режиме абсолютного дальномера (ADM).

Таблица 2.3 – Средние значения результатов измерений API Laser Tracker 3 в режиме ADM.

На- звание точки	Среднее значе- ние по X(мм)	СКО по оси X(мм)	Среднее значение по Y(мм)	СКО по оси Y(мм)	Среднее значе- ние по Z(мм)	СКО по оси Z(мм)
т.1	0,000	0,010	0,0000	0,014	0,0000	0,009
т.2	-1,694	0,012	400,3489	0,011	-0,0341	0,005
т.3	-0,884	0,010	1000,9058	0,010	-0,0512	0,005
т.4	0,000	0,008	1399,5969	0,013	0,0000	0,008
т.5	498,913	0,006	1099,6394	0,009	0,0000	0,004
т.6	497,987	0,007	301,2580	0,012	-0,0810	0,005
т.7	899,695	0,014	-98,5063	0,014	-0,0357	0,010
т.8	899,750	0,012	501,1367	0,005	-0,1264	0,003
т.9	899,172	0,011	900,5229	0,009	-0,1401	0,008
т.10	898,139	0,008	1500,9203	0,016	-0,1596	0,010

Среднее квадратическое отклонение от Contura G2:

$$\sigma_x = 0,013 \text{ мм};$$

$$\sigma_y = 0,016 \text{ мм};$$

$$\sigma_z = 0,004 \text{ мм}.$$

Анализ результатов исследований показал, что API Laser Tracker 3 может быть эффективно использован для геодезического контроля изготовления магнитных элементов и их компонентов.

3.9 Алгоритм вычисления секторов измерений со станции лазерного трекера с учетом допусков

Основным требованием при установке в проектное положение элементов ускорителей заряженных частиц и другого уникального технологического оборудования является со-

блюдение 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

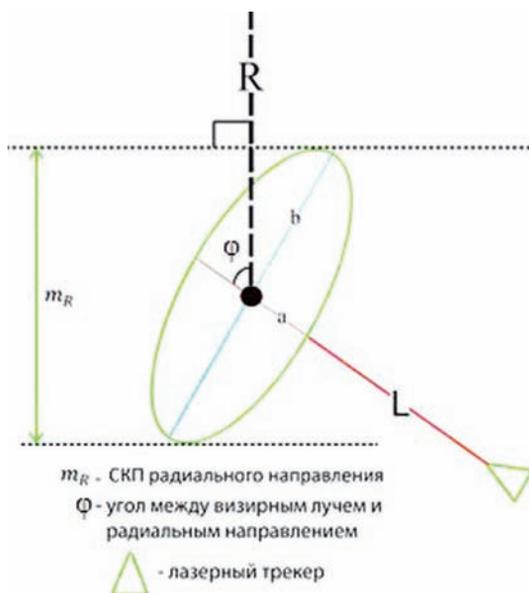


Рисунок 2.23 – Проекция СКП определения положения оборудования на контролируемое направление: a , b – полуоси эллипса погрешностей лазерного трекера; L – расстояние от станции прибора до отражателя; R – радиальное направление

определить проекции на поперечные выделенные направления $m_{R,Z}$, рисунок 2.23.

Поле допуска современных ускорителей в поперечных направлениях к орбите

$$m_{R,Z \text{ доп.}} = 0,05 \text{ мм.} \quad (2.19)$$

Для расчетов возьмем значения погрешностей измерений лазерного трекера API Radian (формулы (2.14), (2.15). 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 2.24

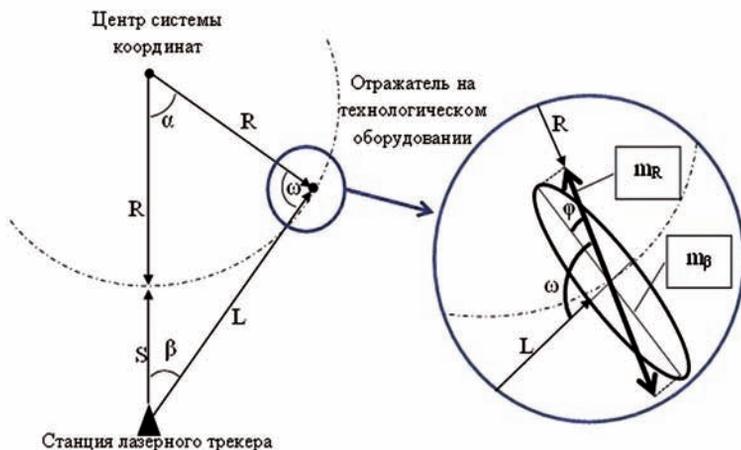


Рисунок 2.24 – Станция за проектным радиусом

Определим расстояние L от станции лазерного трекера до отражателя, который установлен на технологическом оборудовании

довании, и горизонтальный угол β между направлением на центр системы координат и заданной линией [51].

По теореме косинусов определим L и β :

$$L = \sqrt{(R^2 + (R+S)^2 - 2 \cdot R \cdot (R+S) \cdot \cos \alpha)}, \quad (2.20)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{(R+S)^2 + L^2 - R^2}{2 \cdot (R+S) \cdot L} \right), \quad (2.21)$$

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

$$\omega = 180 - \beta - \alpha; \quad (2.22)$$

$$\varphi = \omega - 90. \quad (2.23)$$

Величина m_R :

$$m_R = \cos \varphi \cdot m_\beta. \quad (2.24)$$

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:

$$m_R \leq m_{R \text{ доп.}} \quad (2.25)$$

Результаты, удовлетворяющие этому условию, приведены в таблице 2.4.

Графическая интерпретация результатов расчетов при работе лазерным трекером за кольцевой осью технологического оборудования приведена на рисунке 2.25.

Таблица 2.4

S	L	γ	mr
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

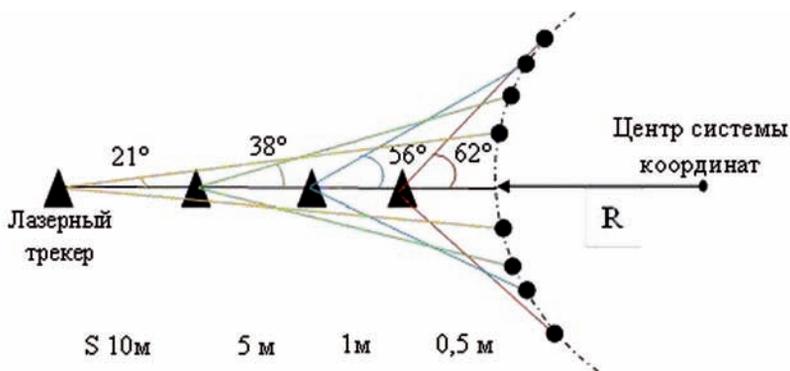


Рисунок 2.25 – Ограничения по рабочему диапазону β , в пределах которых обеспечивается допуск на выставку оборудования для расстояний S

Рассмотрим вариант установки станции внутри проектного радиуса, рисунок 2.26.

Длина L и угол β вычисляются по формулам:

$$L = \sqrt{R^2 + (R - S)^2 - 2 \cdot R \cdot (R - S) \cdot \cos \alpha}; \quad (2.26)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{(R-S)^2 + L^2 - R^2}{2 \cdot (R-S) \cdot L} \right). \quad (2.27)$$

Значения ω , φ , m_R вычисляются по формулам (2.22) – (2.24). Результаты вычислений приведены в таблице 2.5.

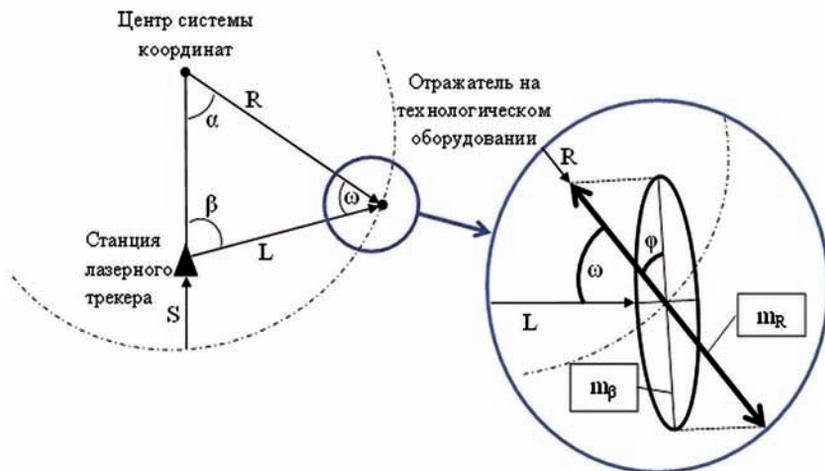


Рисунок 2.26 – Станция внутри проектного радиуса

Таблица 2.5

$S, м$	$L, м$	$\beta, ^\circ$	$m_R, мм$
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 (формула 2.19) 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

$$m_z = \cos \nu \cdot m_v. \quad (2.28)$$

Графическая интерпретация определения m_z представлена на рисунке 2.27.

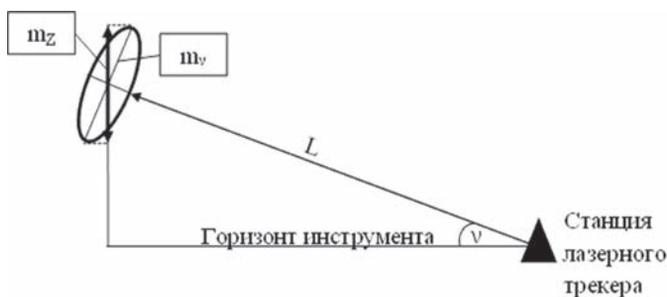


Рисунок 2.27 – Величина m_z

Углы -59° и $+79^\circ$ определяют рабочий диапазон изменений 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 2.28.

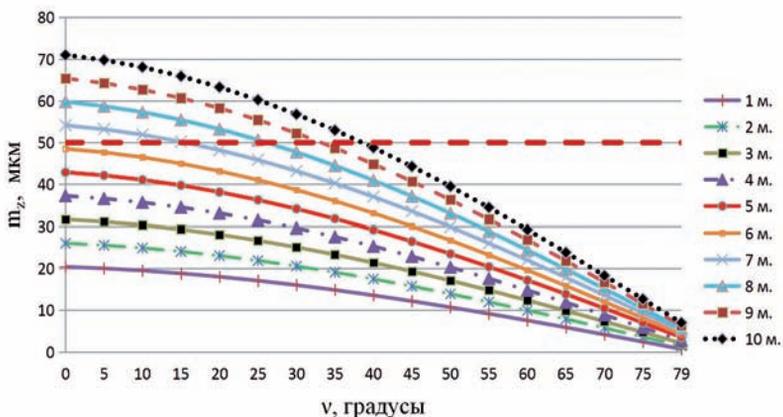


Рисунок 2.28 – График зависимости величины m_z от изменения угла v относительно горизонтальной плоскости для расстояний от 0,5 до 10 м

В качестве выводов по результатам выполненных исследований, представленных во втором разделе выделим следующие.

Лазерные трекеры могут быть эффективно использованы, как основные измерительные средства при монтаже оборудования УНК. Однако, для достижения требуемой точности, перед началом производства геодезических измерений необходимо производить ряд исследований, рассмотренных выше.

В частности, влияние внутренней стабилизации, осуществление проверки работы внутреннего электронного уровня. С помощью разработанного алгоритма вычисления оптимальных секторов измерений со станции лазерного трекера за кольцевой осью тоннеля с радиусом 10 метров удалось установить ограничения, нарушения которых не позволят достичь заданной точности определения координат в 0,07 мм, а именно:

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

Установленный допуск на среднеквадратическую погрешность по вертикальному направлению (m_z) выполняется при расстоянии лазерного трекера до отражателя в 6 м на всем рабочем диапазоне вертикального угла лазерных трекеров API и Radian.

Представленный, разработанный алгоритм может быть использован для расчета секторов работы лазерного трекера горизонтальных и вертикальных углов не только для рассмотренного допуска, но и для других допусков на установку технологического оборудования находящегося на кольцевой оси с различными радиусами.

4 | МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ УНК

4.1 Методика нахождения геометрической оси для паспортизации магнитных элементов комплекса ВЭПП-4м

Инженерно-геодезический контроль позволяет предотвратить брак в определении фактического технического состояния конструкции технологического оборудования, на основе проверки геометрических параметров. Критичность выбранных для геодезического контроля геометрических параметров определялась наибольшим вкладом параметра в конечную погрешность юстировки. Для магнитных элементов выполняется контроль взаимного положения геодезических знаков относительно магнитной оси элемента. Магнитные оси элементов определяются при магнитных измерениях.

До появления API Laser Tracker 3 в ИЯФ нахождение геодезического центра магнитного элемента выполнялось при помощи средств машиностроения. Для нахождения координат геодезических знаков использовались линейки, штангенциркули, микрометры, изготавливались специальные шаблоны. Основным недостатком существующей методики являлось проведение измерений одновременно только по одной координатной оси. Необходимо было применять несколько средств измерений для получения всех трех координат, что приводило в свою очередь к ошибкам определения координат геодезических знаков на внешнем железе магнитного элемента. При изготовлении специальных шаблонов требовалось их компарирование. Для выполнения измере-

ний, магнитный элемент необходимо было устанавливать на поверочную плиту. Сам процесс измерений был достаточно трудоемок и требовал повышенного внимания со стороны персонала.

С появлением API Laser Tracker 3 отпала необходимость в установке измеряемого элемента на поверочную плиту, все три координаты определяются одновременно единственным средством измерения. На рисунке 3.1 представлено сравнение методики измерения магнитных элементов средствами машиностроения с разработанной методикой измерения при помощи API Laser Tracker 3.



Рисунок 3.1 – Сравнение методик геодезических измерений

В качестве примера предложенной методики рассмотрим координирование геодезических знаков на квадрупольных линзах для экспериментального промежутка ВЭПП-4м.

Возникла задача установить в экспериментальном промежутке ВЭПП-4м две квадрупольные линзы. Для решения этой задачи были взяты две линзы с нужными физическими параметрами, рисунок 3.3. Так как эти линзы раньше использовались для другой установки, на них была предусмотрена старая идеология выставки (два геодезических знака и базовая плоскость). Но использовать старую идеологию при установке линзы на ВЭПП-4м оказалось невозможно, так как линза должна быть установлена под углом 45° . На примере линзы L1 предложена методика нахождения механической оси линзы при помощи API Laser Tracker 3, рисунок 3.2.

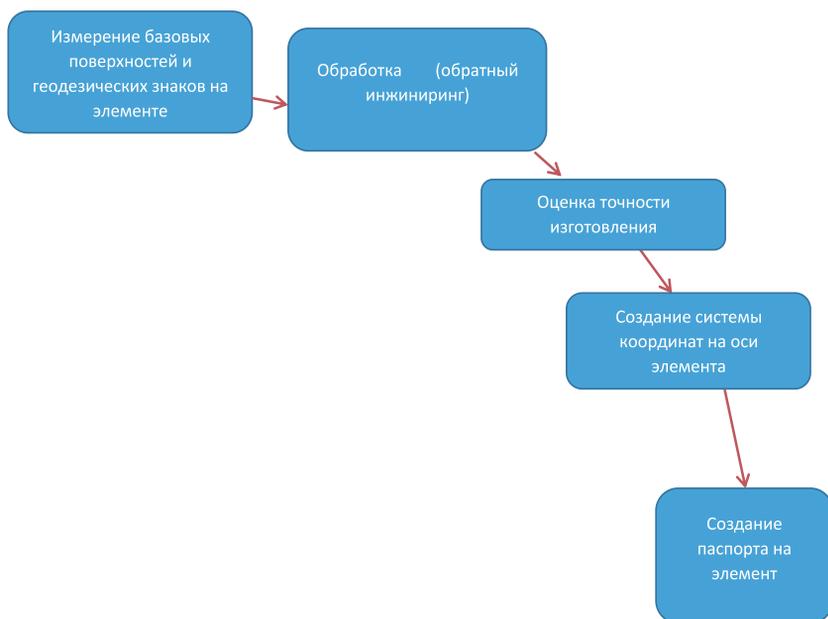


Рисунок 3.2.1 – Этапы нахождения механической оси линзы

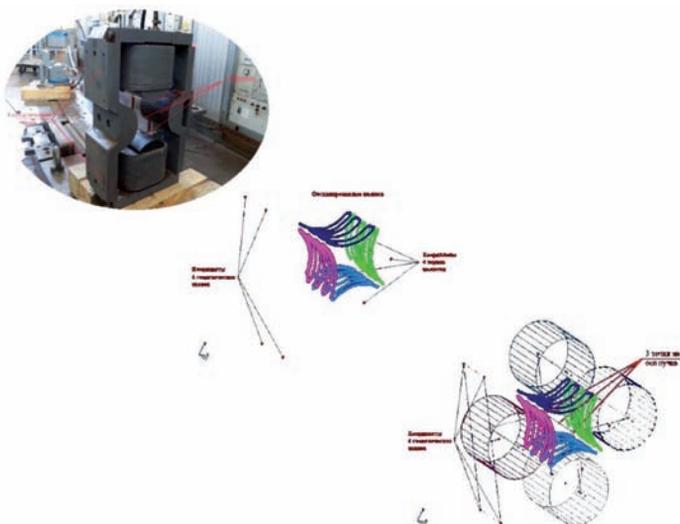


Рисунок 3.2 – Порядок действий для нахождения механической оси элемента

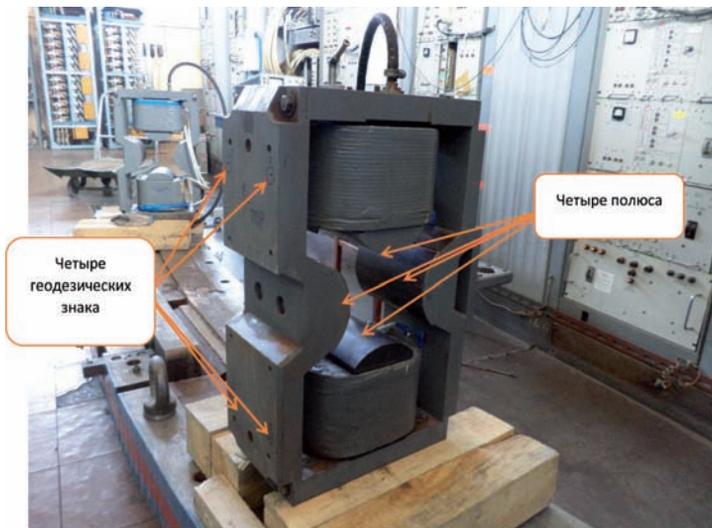


Рисунок 3.3 – Линза L1 для ВЭПП-4м

Цель данной методики определить механическую ось магнитного элемента. Создать систему координат, и в ней определить координаты геодезических знаков, на внешнем железе магнитного элемента. Интегрировать элемент в магнитную структуру ускорительного комплекса. Также оценивается точность изготовления и сборки магнитного элемента.

Произведена доработка линз. В боковой накладке внешнего железа, которая после установки на ВЭПП-4М, должна быть развернута внутрь кольца ускорителя, необходимо заложить четыре геодезических знака. Знак представляет собой отверстие диаметром $6^{+0,03}$ мм. API Laser Tracker 3 был установлен так, чтобы с одной станции была возможность выполнить измерения на четыре геодезических знака, выполнить сканирование поверхности всех четырех полюсов и определить координаты торца каждого полюса. Перед про-

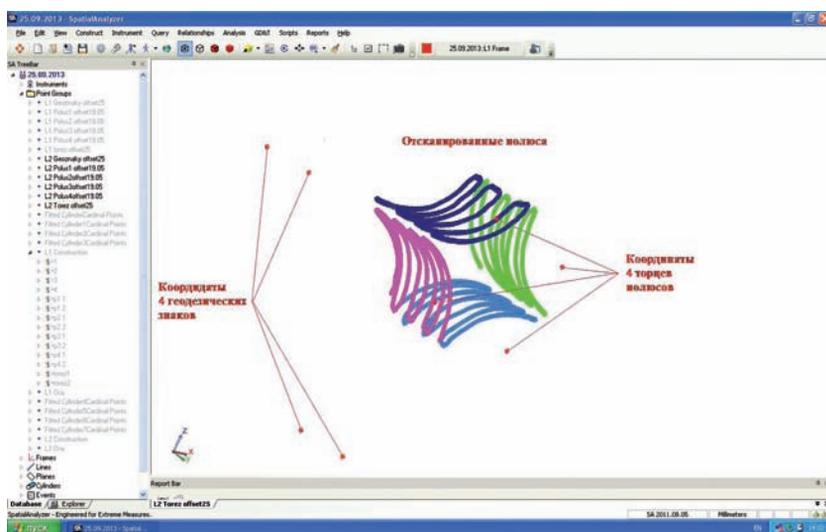


Рисунок 3.4 – Результаты измерений линзы L1

ведением измерений API Laser Tracker 3 был откалиброван. Измерения на четыре геодезических знака и четыре точки на торце, выполнено в режиме Single Point. При одном измерении выполняется 50 отсчетов. Средняя квадратическая погрешность одного измерения составляет 0,006 мм. Сканирование полюсов выполнено в режиме Spatial Scan с шагом 1 мм. Результат измерений показан на рисунок 3.4

Для получения оси пучка в программном обеспечении Spatial Analyzer была выполнена следующая обработка результатов измерений. По каждому сканированному полюсу построен оптимальный цилиндр, вписанный в облако точек. Среднее квадратическое отклонение от оптимального цилиндра для полюсов (на левом полюсе линзы находятся четыре геодезических знака) составило:

$\sigma_{\text{левый полюс}} = 0,011$ мм, максимальное отклонение 0,040 мм по 658 точкам;

$\sigma_{\text{правый полюс}} = 0,014$ мм, максимальное отклонение 0,048 мм по 722 точкам;

$\sigma_{\text{верхний полюс}} = 0,011$ мм, максимальное отклонение 0,039 мм по 709 точкам;

$\sigma_{\text{нижний полюс}} = 0,016$ мм, максимальное отклонение 0,043 мм по 657 точкам.

Для каждого оптимального цилиндра найдены точки начала, середины и окончания цилиндра, по которым в свою очередь построена ось цилиндра. По четырем точкам, измеренным на торцах полюсов, построена плоскость. Плоскость имеет среднее квадратическое погрешность 0,313 мм. Последнее говорит о том, что полюса линзы вдоль орбиты пучка собраны некорректно. Однако в данном случае это не имеет большого значения, поскольку допуск вдоль орбиты пучка может быть грубее на порядок. Пересечение каждой оси ци-

линдра с плоскостью дает четыре точки расположенные на плоскости торца. Необходимо помнить, что эти четыре точки не лежат на физическом железе торца полюса линзы, а находятся в 25 мм от него, так как оснастка, с помощью которой было выполнено измерение, имеет смещение (offset) 25 мм. Для получения точек, расположенных на физическом железе торца линзы, были построены вспомогательные системы координат для оси каждого цилиндра. Вспомогательная система координат строится следующим образом. За начало системы координат берется точка пересечения оси цилиндра с плоскостью. Ось X направляется на точку окончания оси цилиндра. Направление оси Z в данном случае неважно и может быть взято как на предыдущей системе координат или произвольно. В построенной вспомогательной системе координат создаются две точки с координатами, приведенными в таблице 3.1. Следует добавить, что фактическая длина полюса равна 170 мм. Такая же операция повторяется для трех оставшихся полюсов.

Таблица 3.1 – Координаты торцов полюса

Название	X, мм	Y, мм	Z, мм
Торец 1	25	0	0
Торец 2	195	0	0

Полученные точки на противоположащих полюсах, находящиеся на одном торце, соединяются линиями. Точка пересечения этих линий даст механическую ось магнитного элемента на этом торце. Средняя квадратическая погрешность определения механической оси по осям четырех цилиндров составила 0,026 мм. Такая же операция продлевается на втором торце полюсов линзы. В результате применения разработанной методики имеем две точки на механической оси

(вход в магнитный элемент и выход из магнитного элемента), по которым строим линию и находим ее центр, что дает третью точку (середина магнитного элемента). Эти три точки определяют ось пучка магнитного элемента. Среднее квадратическое погрешность определения механической оси относительно геодезических знаков на внешнем железе магнитного элемента составила 0,029 мм. На рисунке 3.5 представлены все выполненные построения и показана ось пучка частиц.

На оси пучка строится система координат. Начала системы координат задает точка входа в магнитный элемент, ось X направлена на точку выхода из магнитного элемента, ось Y перпендикулярна плоскости, проведенной по четырем геодезическим знакам. Для получения заданного проектного угла (элемент должен висеть под углом 45°) разворачиваем систему координат вокруг оси X на 45° в нужную сторону. После

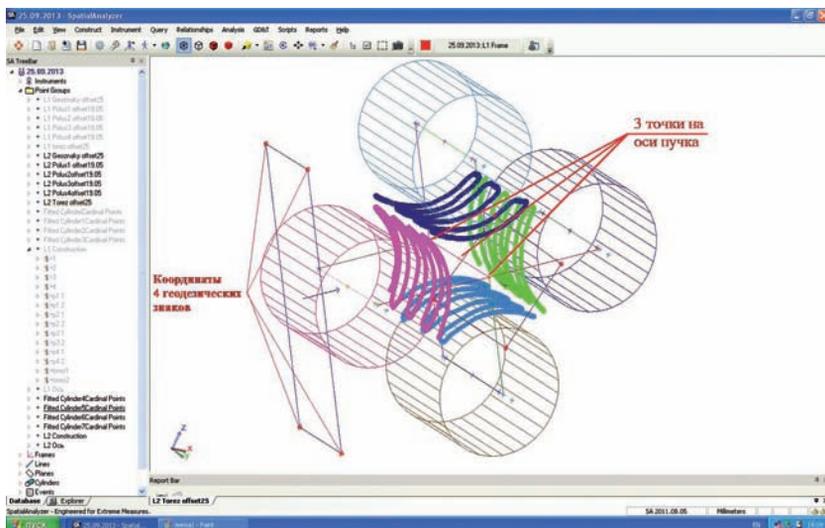


Рисунок 3.5 – Три точки на оси пучка частиц

этого координаты четырех геодезических знаков и координаты трех точек на орбите пучка экспортируется в текстовый файл. Текстовый файл с координатами магнитного элемента подгружается в файл с установкой в данном случае комплекс ВЭПП-4м. Причем, текстовый файл должен быть загружен именно в систему координат комплекса ВЭПП-4м (где X, Y плановые координаты, Z-высота), поскольку элемент в нем уже расположен под нужными нам углами. В файле комплекса ВЭПП-4м физиками заданы три точки с проектными координатами положения магнитного элемента в структуре ускорителя. Точка входа в элемент, середина элемента и выход из элемента. На последнем этапе необходимо совместить ось пучка, обозначенную тремя точками на элементе, с тремя точками в структуре ускорителя. Это совмещение нужно выполнить с одним условием: - магнитный элемент не должен вращаться вокруг осей X и Y. Возможно смещение по трем осям и разворот вокруг оси Z. После совмещения трех точек магнитный элемент установлен в структуру ускорителя. Следующим этапом производилась установка элемента по полученным координатам непосредственно на ускорительном комплексе.

Разработанная методика применяется для паспортизации магнитных элементов в ИЯФ СО РАН.

4.2 Методика геодезического обеспечения при изготовлении дипольных магнитов для бустера NSLS-II

Цель разработанной методики заключается в определении положения внешних геодезических знаков на дипольном магните относительно магнитного центра элемента. Магнитный центр элемента вычисляется по результатам магнитных измерений на специальном стенде при помощи каретки с

датчиками Холла. Во время проведения магнитных измерений положение каретки фиксируется при помощи API Laser Tracker 3.

Дипольный магнит (поворотный) – в физике ускорителей элемент создающий однородное магнитное поле. Используется, в первую очередь, для создания ведущего поля, задаю-

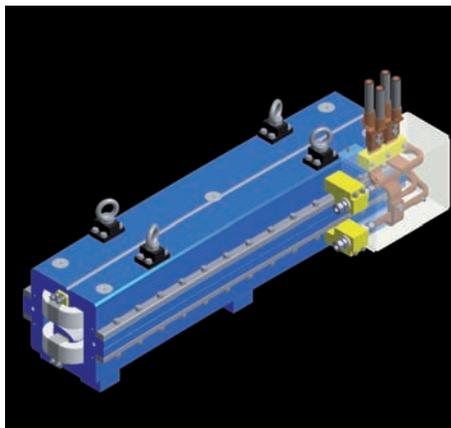


Рисунок 3.6 – VF фокусирующий магнит

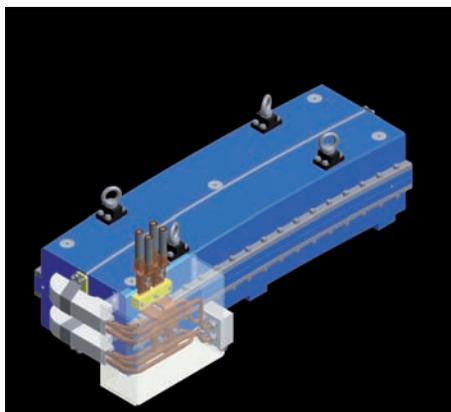


Рисунок 3.7 – BD дефокусирующий магнит

щего траекторию пучка заряженных частиц, а также в системах впуска/выпуска пучка, для коррекции равновесной орбиты и пр.

Для кольца бустера NSLS-II существует два типа магнитов: ВF-фокусирующий магнит и ВD-дефокусирующий магнит. На рисунках 3.6, 3.7 представлены модели ВF фокусирующего и ВD дефокусирующего магнита. Магниты имеют разные геометрические параметры.

Для определения точного местоположения орбиты пучка, на каждом магните предусмотрены по 13 геодезических знаков. Пять знаков на верхней площадке магнита и по четыре с каждого торца. Для сравнения на магнитах ускорителя ВЭПП-4м используется два знака и базовая плоскость. Геодезические знаки представляют собой отверстия диаметром $6,35^{+0,01}$ мм, засверленные в теле магнита перпендикулярно плоскости с точностью 0,01 мм. Отверстия предназначены для стандартной подставки под отражатель с диаметром хвостовика 6,35 мм. Сама подставка имеет допуск на диаметр хвостовика $-0,002$ мм. Погрешность положения центра отражателя относительно хвостовика составляет 0,02 мм. После изготовления, по знакам осуществляются геодезические измерения на координатно-измерительной машине Contura G2 и производится их привязка к базовым поверхностям на полюсе магнита (в локальной системе координат). Для получения центра геодезического знака используется стандартный полуторадиймовый отражатель с подставкой для API Laser Tracker 3. По многочисленным измерениям геометрический центр отражателя был определен со средней квадратической погрешностью 0,001 мм. Согласно паспорту на отражатель отличие геометрического центра от оптического составляет $0,002 \div 0,003$ мм. Для минимизации этой погрешности отражатель устанавливается по возможности единообразно на

все измеряемые геодезические знаки (нанесенным номером вверх). Для определения местоположения орбиты пучка требуется проведение измерений на специальном стенде магнитных измерений, рисунок 3.8.



Рисунок 3.8 – Общий вид стенда магнитных измерений



Рисунок 3.9 – Каретка с датчиками холла и отражателями

Основная задача этого технологического процесса заключается в привязке магнитной оси дипольного магнита к 13 геодезическим знакам, расположенным на внешнем железе магнита. Для проведения измерений магнитного поля было изготовлено два комплекта оснастки (так как магниты имеют разную конструкцию). Оснастка включает в себя каретку с закрепленными на ней датчиками Холла, двумя 8 мм отражателями для API Laser Tracker 3 и высокоточную направляющую для данной каретки.

На каретке смонтирована медная пластина с датчиками Холла, посадочные места под два отражателя для API Laser Tracker 3 и площадки для движения по направляющим, рисунок 3.9.

Положение датчиков Холла определено при помощи микроскопа УИМ-23 с привязкой к базовым поверхностям на медной пластине [41]. Средняя квадратическая погрешность определения положения датчиков Холла 0,01 мм, точнее определить не представляется возможным из-за конструктивных особенностей и небольшого размера (0,1 x 0,05 мм) датчиков. В свою очередь медная пластина установлена на каретке при помощи координатно-измерительной машины Contura G2. Измерены и зафиксированы расстояния между базовыми плоскостями на каретке и медной пластине ($\sigma = 0,002$ мм). Так же на каретке при помощи координатно-измерительной машины Contura G2 установлены шесть площадок для движения по направляющим. Четыре площадки определяют вертикальное положение датчиков Холла, две горизонтальное. Напротив каждой из площадок установлена прижимная пружинная пластина. Пластина должна обеспечивать контакт каретки с направляющей.

Одной из сложных задач оказалась определение положения центров отражателей, расположенных на каретке, ри-

сунок 3.10. Из-за маленьких размеров призма отражателя конструктивно размещена в пластиковом корпусе, который не имеет привязки к центру отражателя. То есть, отражатель пригоден только для проведения относительных измерений. В данном случае требовались абсолютные координаты центров отражателей в системе координат каретки. Выполнена привязка оптических центров отражателей к системе координат каретки. Для этого на плите координатно-измерительной машины Contura G2 закреплены: каретка, API Laser Tracker 3, пять геодезических знаков под стандартный полуторадюмовый отражатель. Каретка располагается на одной высоте, с осью вращения вертикального круга API Laser Tracker 3. Сделано это для того чтобы минимизировать ошибку определения координат из-за угла падения луча в отражатель.

Координатно-измерительная машина Contura G2 определяет координаты базовых поверхностей на каретке и медной пластине. После этого задается система координат каретки. В этой системе координат, поочередно, совместно с API Laser Tracker 3, определяется положение центра полуторадюмового отражателя, установленного на каждый из пяти геодезических знаков, закрепленных на плите. После того как API Laser Tracker 3 выполняет 50 отсчетов на центр отражателя, определяется среднее значение. Координатно-измерительная машина Contura G2, измеряет наружную сферу отражателя, в 25-30 точках, по которым вычисляется геометрический центр сферы. После выполнения измерений на пяти геодезических знаках, закрепленных на плите, API Laser Tracker 3 определяет положение двух отражателей, закрепленных на каретке. После окончания измерений имеем два набора данных:

- базовые поверхности и пять геодезических знаков на плите в системе координат каретки, измеренные координат-

но-измерительной машиной Contura G2 Средняя квадратическая погрешность определения 0,005 мм;

- пять геодезических знаков на плите и координаты центров отражателей закрепленных на каретке в системе координат лазерного трекера, измеренные API Laser Tracker 3. Средняя квадратическая погрешность определения 0,007 мм.

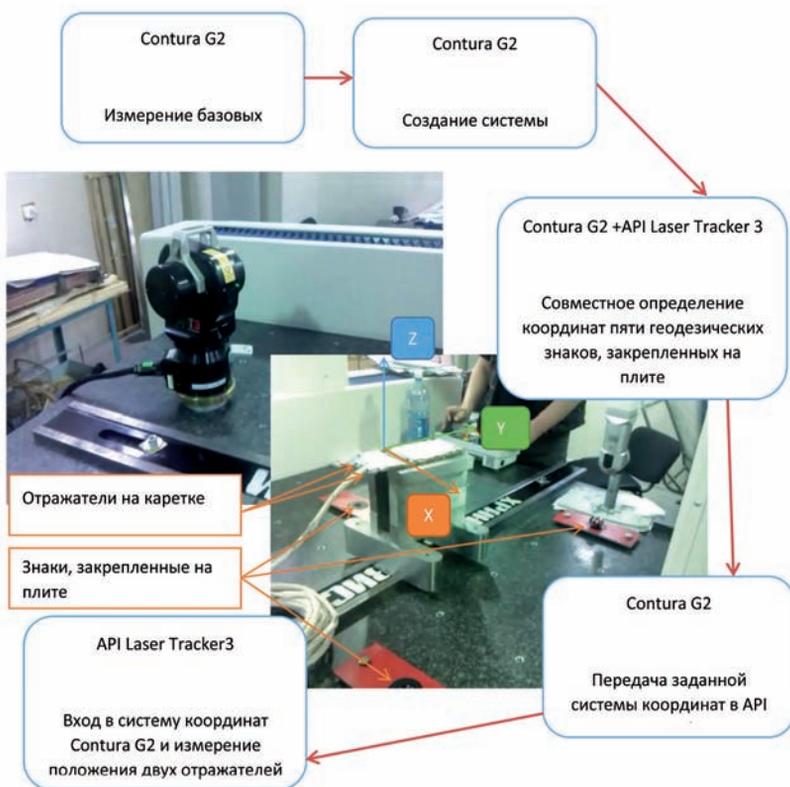


Рисунок 3.10 – Геодезическая привязка отражателей к системе координат каретки

Для пересчета координат центров отражателей закрепленных на каретке, пять геодезических знаков измеренных API Laser Tracker 3, ориентируются по пяти геодезическим знакам измеренных координатно-измерительной машиной Contura G2, так чтобы сумма квадратов отклонений была минимальна. Эта привязка выполняется в системе координат каретки. Средняя квадратическая погрешность привязки составила 0,01 мм по результатам многочисленных измерений.

После выполнения привязки местоположение API Laser Tracker 3 и полученные в результате измерений координаты центров отражателей, закрепленных на каретке, определены в системе координат каретки.

Дальнейшие измерения выполняются непосредственно на магните совместно с измерениями магнитного поля на специальном стенде магнитных измерений.

3.2.2. Опыт применения API Laser Tracker 3 на стенде магнитных измерений ИЯФ СО РАН

На стенде магнитных измерений установлена металлическая плита 4x6 м толщиной 300 мм. Плита установлена на резиновые опоры, чтобы ослабить влияние возможных вибраций. На плите смонтированы два гирдера на стандартных подставках. По периметру плиты закреплено девять геодезических знаков, установлена подставка под API Laser Tracker 3. Стандартные подставки под гирдера имеют возможность регулировки по высоте 50 мм и в плане 25 мм. Для проведения геодезических измерений на гирдер устанавливается магнит, в него вкладывается высокоточная направляющая и фиксируется на базовых поверхностях (для контроля расстояний между базовыми поверхностями на направляющей и торцевыми геодезическими знаками измеряется концевыми мерами длины 1 кл.).

Высокоточная направляющая предназначена для позиционирования каретки внутри магнита, рисунок 3.11. Имеет



Рисунок 3.11 – Высокоточная направляющая

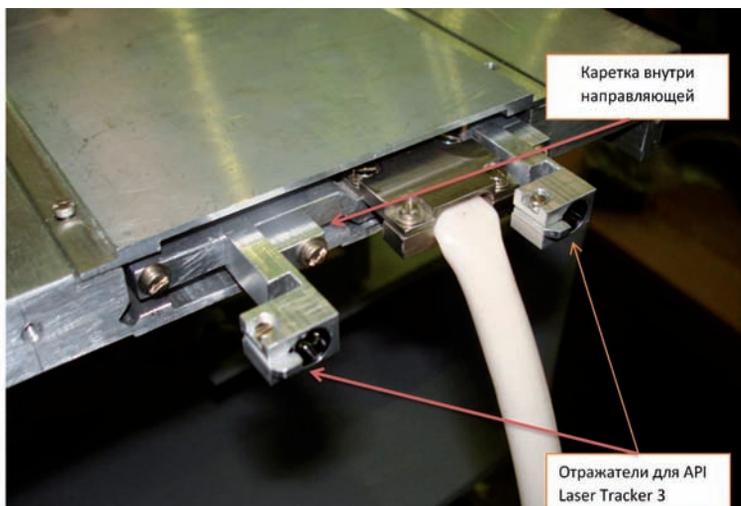


Рисунок 3.12 – Каретка внутри направляющей

базовые поверхности и посадочные места для закрепления на магните. Прямолинейность направляющей проверена на координатно-измерительной машиной Contura G2 и составляет 0,04 мм на двух метрах. Направляющая сконструирована с таким расчетом, чтобы датчики Холла на каретки находились в медианной плоскости магнита.

На рисунке 3.12 представлена каретка, расположенная внутри высокоточной направляющей.

Лазерный трекер устанавливается на свою подставку, рисунок 3.13. Для более жесткой фиксации подставка под трекер не имеет возможности регулировки по высоте. Медианная плоскость магнита устанавливается на высоту оси вращения вертикального круга API Laser Tracker 3 при по-



*Рисунок 3.13 – Закрепление лазерного трекера
на стенде магнитных измерений*

мощи регулировок по высоте на стандартных подставках под гирдер. Для протяжки каретки внутри направляющей, используется шаговый двигатель с измерителем перемещений, жестко закрепленный на противоположной трекеру стороне гирдера.

3.2.3. Геодезические измерения для определения положения каретки внутри магнита.

Необходимо определить координаты центров отражателей, закрепленных на каретке, относительно геодезических знаков дипольного магнита в системе координат магнита.

Каретка устанавливается в направляющую, подсоединяется механизм протяжки и кабель коммутации. От базовой поверхности на торце направляющей устанавливается начальная позиция каретки, при этом должны быть выбраны все люфты в механизме протяжки. API Laser Tracker 3, расположенный на подставке, определяет координаты геодезических знаков на плите (по возможности все девять штук). Так же определяются координаты двух ближних геодезических знаков на верхней поверхности магнита.

Лазерный трекер наводится на один из отражателей, расположенных на каретке. В программном комплексе трекера, Spatial Analyzer, устанавливается режим работы “съемка стабильной точки”. Этот режим предназначен для съемки точки, которая остается стабильна в течении заданного времени. Запускается механизм протяжки. Шаг протяжки 5 мм измеряется и дополнительно фиксируется измерителем перемещений на шаговом двигателе. Пауза между шагами 1-2 секунды. За это время трекер успевает определить, что координаты центра отражателя стабильны, и выполнить измерение, взяв 50 отсчетов, из которых находится среднее значение. Средняя квадратическая погрешность определения 0,025 мм. Таким

образом, делается 350 шагов, что составляет со всеми подготовками 40 минут. Затем каретка возвращается в исходное положение и измерения повторяются снова. Для каждого из отражателей с целью контроля делается по два прохода по 350 шагов каждый. Полный цикл геодезических измерений магнита занимает около 4 часов. После этого контролируется положение трекера относительно геодезических знаков, расположенных на плите и положение магнита по двум видимым знакам на верхней площадке. Средняя квадратическая погрешность определения 0,025 мм. Если среднее квадратическое отклонение центров геодезических знаков отличается от ранее полученных, из предыдущих измерений, более чем на 0,04 мм, измерения бракуются и повторяются снова. Лазерный трекер переставляется на штатив. С этой станции выполняются измерения на геодезические знаки, расположенные на плите и все знаки на верхней площадке магнита. Средняя квадратическая погрешность определения 0,015 мм.

3.2.4 Обработка результатов геодезических измерений

В программный комплекс Spatial Analyzer вводятся координаты геодезических знаков на магните, полученные при помощи координатно-измерительной машины Contura G2. К этим геодезическим знакам с помощью наилучшей привязки (сумма квадратов отклонений по группе знаков должна быть минимальна) осуществляется привязка станции трекера на штативе. В свою очередь к станции трекера на штативе привязывается станция трекера на жестко закрепленной подставке, расположенной на плите. Средняя квадратическая погрешность этих привязок не превышает 0,049 мм. В итоге получаем координаты центров отражателей, расположенных на каретке в локальной системе координат данного магнита. Результат определения координат центров отражателей, рас-

положенных на каретке и информация о положении датчиков холла относительно отражателей, закрепленных на каретке, передается физикам для введения поправки за

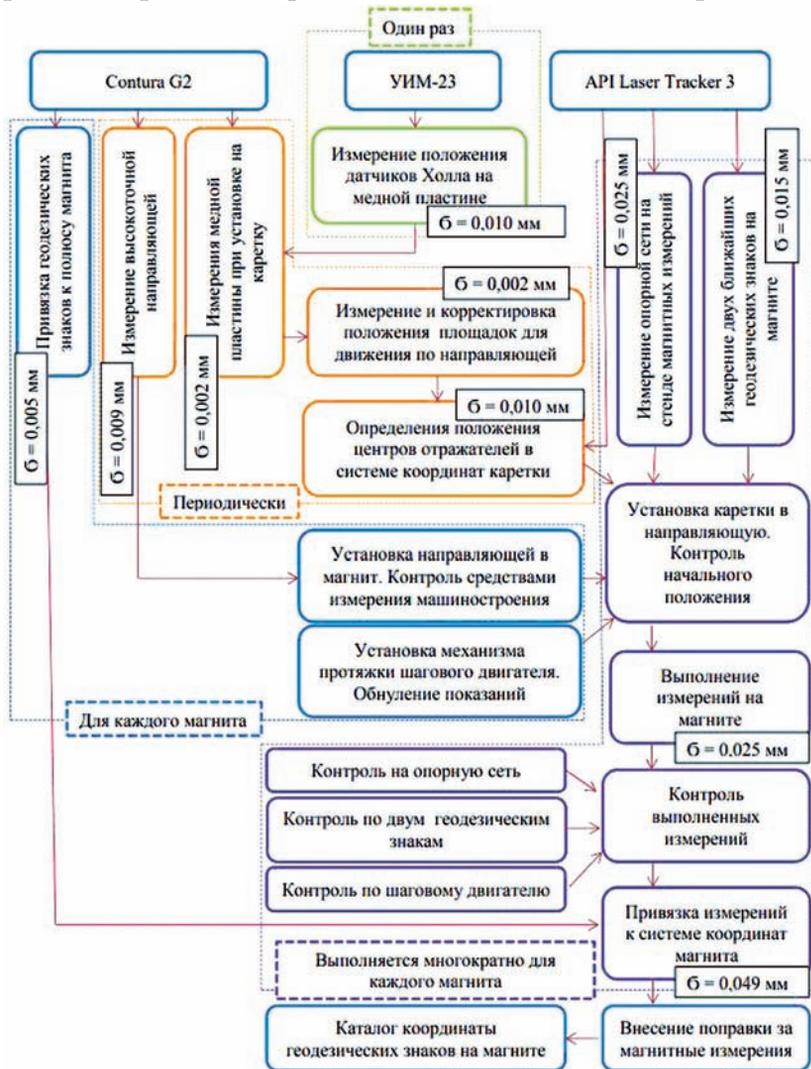


Рисунок 3.14 – Блок-схема контроля изготовления магнитов

магнитные измерения. Поправка вводится путем смещения и разворота системы координат магнита. Величина поправки может достигать до 0,5 мм в смещениях координат геодезических знаков. Эта величина обусловлена неоднородностью материала и точностью изготовления магнита. Разработанную методику можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 3.14.

После пересчета с учетом поправки на магнитные измерения получаем каталог координат геодезических знаков магнита в локальной системе координат. Координаты геодезических знаков относительно магнитной оси элемента определены со средней квадратической погрешностью 0,065 мм. Физиками на основании проведенных магнитных измерений определяется какой дипольный магнит, в каком месте кольца бустера будет установлен. После этого выдаются проектные координаты на каждый магнит. Из локальной системы координат координаты дипольного магнита пересчитываются в систему координат бустера NSLS-II и используются для сборки модулей. Так же эти координаты используются для монтажа модулей в тоннеле бустера NSLS-II.

Для каждого магнитного элемента был составлен паспорт в который помимо физических параметров были внесены данные о положении магнитной оси относительно внешних геодезических знаков на элементе. Магнитная ось получена по результатам магнитных измерений с контролем геометрического положения датчиков Холла в элементе, либо по результатам механических обмеров полюсов элемента [2,3]. Магнитная ось представлена тремя точками (вход, середина и выход из элемента). По этим точкам строится локальная система координат каждого элемента, для которой в свою очередь определяются координаты внешних геодезических знаков. Эта информация заносится в паспорт элемента. На

рисунке 3.24 показан ВД дипольный магнит (вид сверху) и схема расположения и название знаков.



Рисунок 3.24 – Расположение и название геодезических знаков на дипольном магните.

BR- Booster Ring, A3- арка номер три, BD8 - дефокусирующий магнит номер восемь, in – вход, centre- середина, out – выход, F- номер геодезического знака.

4.3 Геодезическое обеспечение измерений квадрупольных и секступольных линз для бустера NSLS-II

Квадрупольная, рисунок 3.15, и секступольная, рисунок 3.16, линзы – это электромагнитные элементы, для фокусировки пучков заряженных частиц с помощью магнитного поля квадрупольной и секступольной конфигурации.

Проведение магнитных измерений и привязка геодезических знаков к оси пучка осуществлена на двух специально изготовленных стапелях. На рисунке 3.17 изображены два

стапеля с установленными на них магнитными элементами. Ближний стапель с квадрупольной линзой. Дальний стапель с секступольной линзой.

Стапеля изготовлены из стали, имеют жесткую конструкцию, исключая возможные смещения измеряемых элементов в процессе измерения. Стапеля размещены на стенде магнитных измерений, установлены на резиновые площадки, чтобы минимизировать возможные вибрации. На базо-

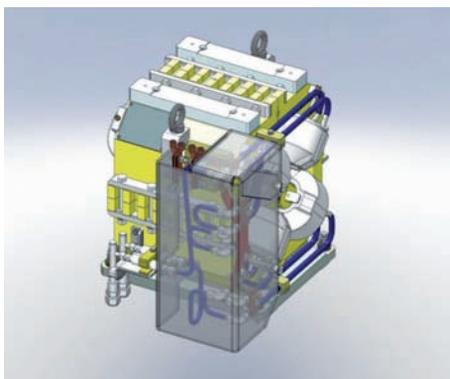


Рисунок 3.15 – Квадрупольная линза

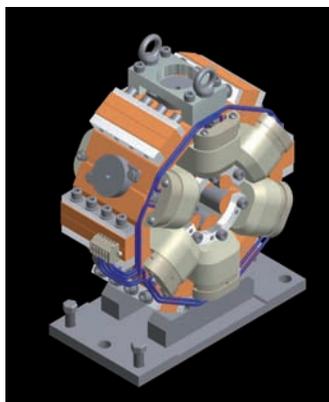


Рисунок 3.16 – Секступольная линза

вой поверхности стапеля в специальных направляющих были закреплены: жесткая подставка под API Laser Tracker 3, подставка для юстировки магнитного элемента, высокоточная направляющая для измерительной катушки, направляющие для шагового двигателя и угломера. Базовая поверхность стапеля имеет 12 геодезических знаков. Геодезические знаки представляют собой отверстия диаметром $6,35^{+0,01}$ мм, засверленные в теле стапеля перпендикулярно базовой поверхности с точностью 0,01 мм. Знаки расположены четырьмя группами по три знака в каждой вокруг магнитного элемента. Между собой в группе геодезические знаки разнесены на 100 мм, расстояния между группами ~ 700 мм. Жесткая подставка для API Laser Tracker 3 имеет возможность смещения около 400 мм перпендикулярно оси измеряемого магнитного элемента. Это сделано для того, чтобы выбрать наиболее подходящую точку для установки прибора, обеспечивающую видимость базовых поверхностей на катушке, геодезических знаков на стапеле и геодезических знаков на измеряемом магнитном элементе. Необходимо отме-



Рисунок 3.17 – Стапеля с квадруполем (ближний стапель)
и секступолем (дальний стапель)

тять, что эти стапеля изготавливались как универсальные для разных типов и конструкции магнитных элементов. Подставка для юстировки магнитного элемента имеет шесть степеней свободы, позволяет опускать, поднимать элемент, наклонять, смещать параллельно и перпендикулярно стапелю. Диапазоны юстировки от 20 до 50 мм. Высокоточная направляющая для катушки предназначена для установки измерительной катушки с датчиками Холла, имеет жесткую фиксацию к стапелю. Направляющая задает ось, на которую впоследствии устанавливается магнитный элемент при помощи подставки для юстировки магнитного элемента. Направляющая для шагового двигателя и угломера позволяет установить шаговый двигатель и угломер на ось вращения катушки с датчиками Холла. При производстве геодезических измерений эти два элемента должны быть сняты со стапеля.

Квадрупольная линза имеет четыре геодезических знака, расположенных на двух специальных накладках. Накладки представляют собой металлические бруски, установленные на верхней половине квадрупольной линзы. После установки бруски отшлифованы параллельно горизонтальной плоскости разъема квадрупольной линзы с заданным размером $207 \pm 0,05$ мм. Полученная плоскость считается внешней базовой плоскостью квадрупольного элемента. Геодезические знаки представляют собой отверстия диаметром $6,35^{+0,02}$ мм, засверленные в теле накладок перпендикулярно базовой плоскости с точностью 0,01 мм.

Секступольная линза имеет пять геодезических знаков, расположенных на специальных накладках. Накладки установлены на внешнее железо при помощи специального штифта и двух болтов. Пять геодезических знаков установлены на пять полюсов линзы. На шестом полюсе она сама стоит

на подставке. Геодезические знаки так же представляют собой отверстия $\varnothing 6,35^{+0,02}$ мм, засверленные в теле накладок.

Геодезические измерения для привязки магнитной оси катушки к внешним геодезическим знакам на линзах

Магнитный элемент (квадруполь или секступоль) устанавливается на магнитную ось катушки при помощи юстировочных узлов. Магнитная ось определяется с помощью датчиков Холла, расположенных на катушке. Вращение элемента вокруг катушки контролируется при помощи электронного уровня. После проведения магнитных измерений и определения магнитной оси элемента выполняются измерения трекером. Цель геодезических измерений: привязка положения магнитной оси элемента к внешним геодезическим знакам.

Трекер, установленный на жесткую подставку стапеля, измеряет положение геодезических знаков на стапеле. По этим знакам строится плоскость и задается система координат. Затем измеряется положение геодезических знаков, расположенных на магнитном элементе и доступное железо торца магнитного элемента (примерно 10-15 точек). После чего магнитный элемент снимается со стапеля. Так же со стапеля снимается шаговый двигатель с угломером и катушка с датчиками Холла. Вместо катушки укладывается специальная скалка, имеющая тот же диаметр, что и высокоточные подшипники катушки. При помощи режима Spatial Scan API Laser Tracker 3 сканируется положение скалки. По полученному облаку точек строится оптимальный цилиндр (средняя квадратическая погрешность оси скалки составляет 0,01 мм). На основании этого определяется ось оптимального цилиндра, которая так же является и осью катушки в системе координат стапеля. По измерениям на торцевые точ-

ки строится плоскость. Вычисляется точка пересечения оси катушки с плоскостью торца магнитного элемента. В этой точке строится новая система координат, где ось X направлена вдоль оси катушки, а ось Z перпендикулярна плоскости стапеля. Координаты геодезических знаков, расположенных на элементе, пересчитанные в новую систему координат, заносятся в паспорт. По данной методике были изготовлены все дипольные и секступольные линзы для бустера NSLS-II.

5 | ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 4-го ПОКОЛЕНИЯ ESRF-EBS

5.1 Европейский источник СИ (European Synchrotron Radiation Facility (ESRF))

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 7000 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. [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 (BPM) 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 3.18.

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).

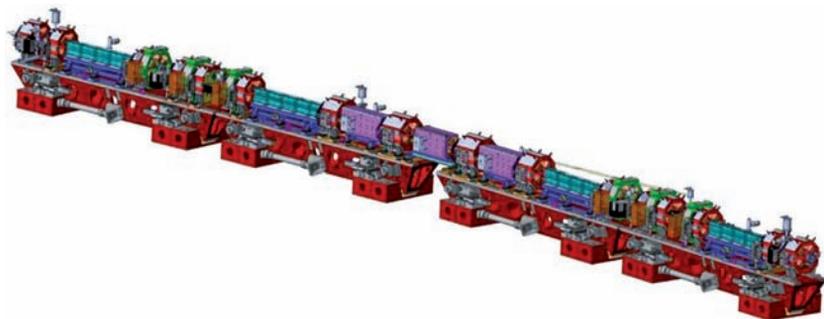


Рисунок 3.18 – Ускоряющая секция источника СИ ESRF – EBS

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 3.19. 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 3.20. 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 3.21, б. Габариты гирдера: 5,1 × 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.

Перед установкой магнитных элементов гирдер горизонтируют. На каждой опоре установлены электродвигатели, позволяющие перемещать гирдер в вертикальной плоскости

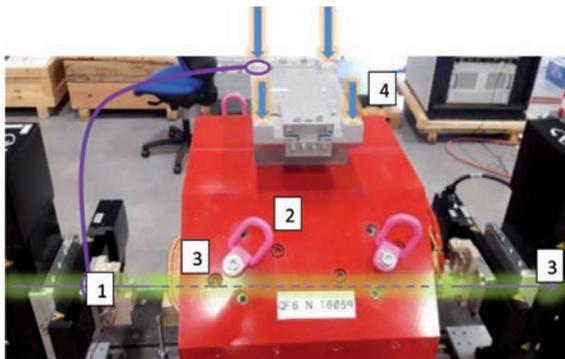


Рисунок 3.19 – Определение координат реперных знаков элементов на стенде магнитных измерений ESRF:

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

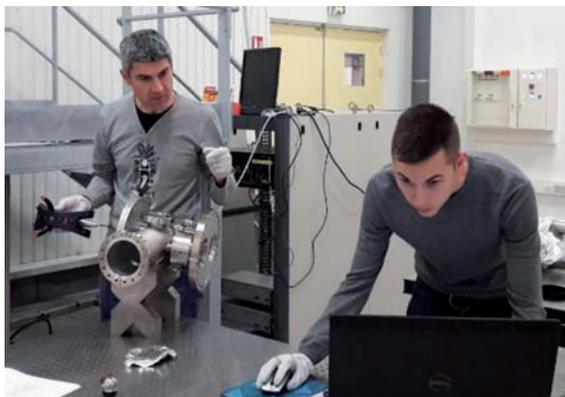


Рисунок 3.20 – Процесс измерения ВРМ с помощью Leica T-probe

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 3.21, а. В этой ЛСК измеряют

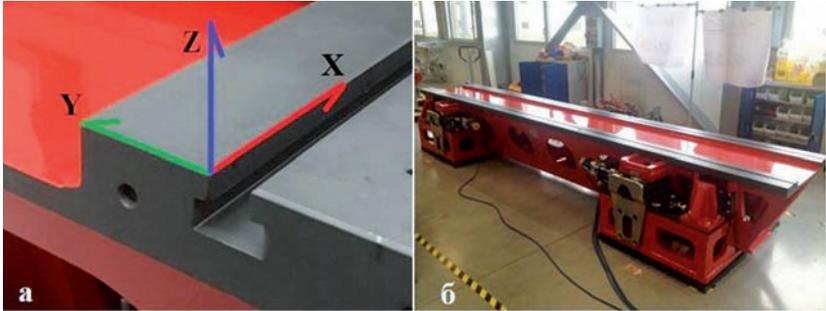


Рисунок 3.21 – Гирдер источника СИ ESRF-EBS:
а) система координат гирдера;
б) общий вид гирдера без установленных элементов

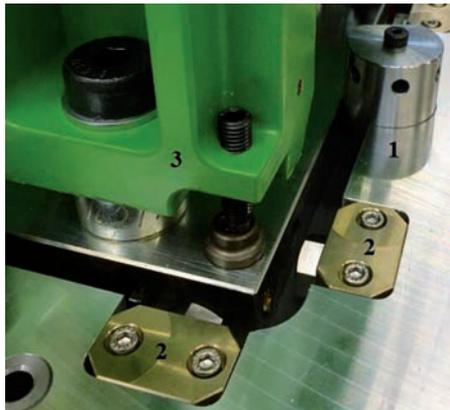


Рисунок 3.22 – Шаблоны для юстировки магнитных элементов на гирдере: 1 – упор предварительной выставки; 2 – юстировочные болты; 3 – электромагнит

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.

Предварительная установка и юстировка магнитных элементов на гирдер осуществляются с помощью специальных шаблонов, рисунок 3.22. 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.

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 3.2. Система координат – в соответствии с рисунком 3.21 а.

В таблице 3.3 указаны средние квадратические погрешности (СКП) положения элементов от этапа магнитных измерений до установки в кольцо ускорителя по результатам измерений 70 гирдеров.

Таблица 3.2

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 3.3

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 3.23 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.

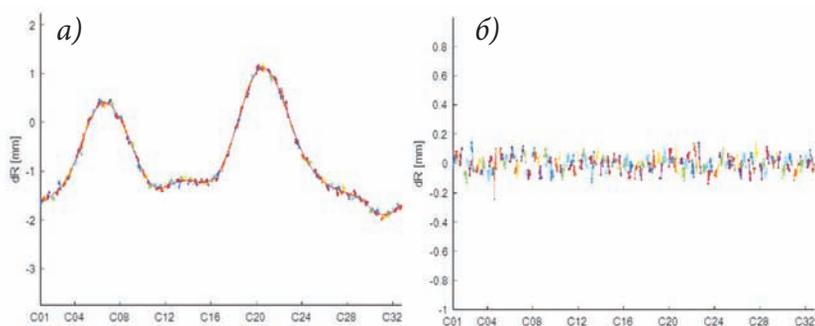


Рисунок 3.23 – Положение элементов структуры источника СИ ESRF-EBS:

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

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 геодезиче-

ских 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 4.1. Если элементы устанавливаются на гирдер, сам модуль также является носителем дополнительных знаков, которые используются при монтаже в тоннеле.

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 4.2.

В соответствии с рисунком 2.23 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 эле-

мента 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].



Рисунок 4.1 – Расположение геодезических знаков на элементах основного кольца ESRF-EBS

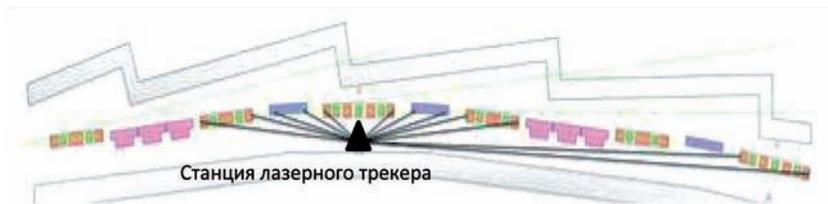


Рисунок 4.2 – Измерения в тоннеле ускорительного комплекса со станции лазерного трекера

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.

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.

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 4.3. 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].

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

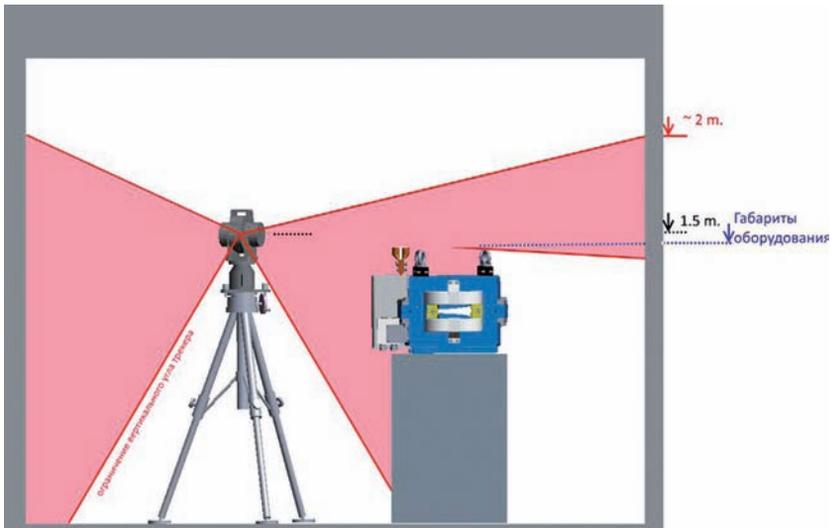


Рисунок 4.3 – Зоны установки геодезических знаков
в поперечном сечении тоннеля

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

Основные аспекты современного подхода 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 (CAD-программы) с разработчиками уникального ускорительно-накопительного комплекса.

Схема построения СГС УНК приведена на рисунке 4.4.

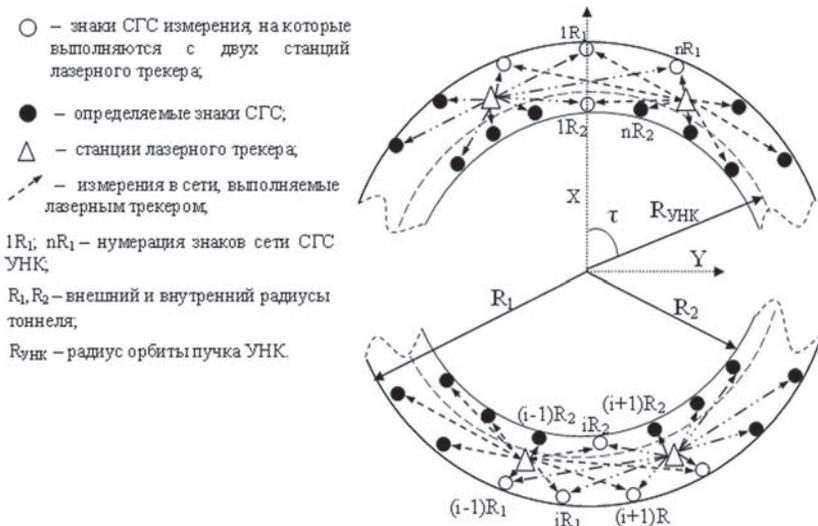


Рисунок 4.4 – Схема построения специальной геодезической сети УНК

Схема методики проектирования СГС УНК показана на рисунке 4.5.

Алгоритм расчета проектных координат, количества знаков сети специальной геодезической сети и станций лазер-

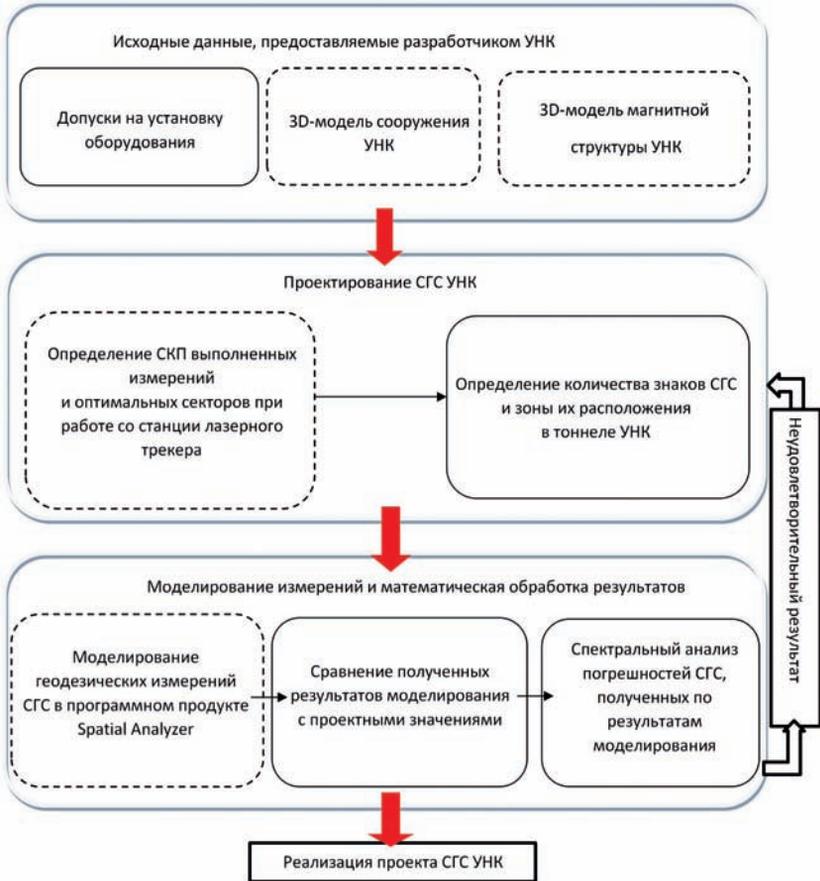


Рисунок 4.5 – Схема методики геодезического обеспечения для монтажа технологического оборудования источников синхротронного излучения (пунктиром обозначены новые блоки)

ного 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 4.6.

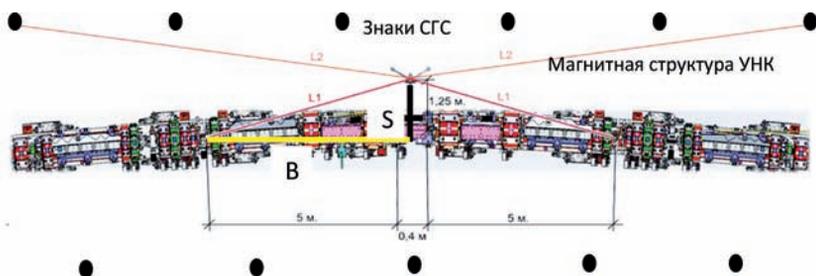


Рисунок 4.6 – Схема измерений со станции лазерного трекера при монтаже оборудования ускорительно-накопительного комплекса

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

$$L_1 = \sqrt{S^2 + B^2} = \sqrt{1,25^2 + 5,2^2} = 5,3 \text{ м}; \quad (4.1)$$

$$L_2 = \frac{L_1 \cdot m_{R,Z_{\text{знак}}}}{\sqrt{m_S^2 + m_{\beta,v}^2}} = 10,6 \text{ м}, \quad (4.2)$$

– 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:

$$\tau_{R_{1,2}} = \frac{(L_2 / 2) \cdot 180}{\pi \cdot R_{1,2}}, \quad (4.3)$$

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

$$N = \frac{360}{\tau_{R_1}} + \frac{360}{\tau_{R_2}}; \quad (4.4)$$

– определение координат положения станций инструмента. Радиальное положение:

$$R_{ст.} = R - 1, \quad (4.5)$$

где R – радиальное положение орбиты пучка частиц, м.

Угол между станциями вычисляется по формуле:

$$\tau_{\text{ст.}} = \frac{L_2 \cdot 180^\circ}{\pi \cdot R_{\text{ст.}}} \quad (4.6)$$

5.2 Инженерно-геодезическое обеспечение стадий и способов монтажа физического оборудования ускорителей

Геометрические параметры орбиты заданы физическим проектом для установки. Проектная орбита бустера определена точками вход, середина и выход из элемента в единой системе координат, рисунок 4.7. Каждая точка помимо трех координат (X,Y,Z) имеет уникальное имя в данной структуре. Эти данные используются как основа для сборки структуры бустера.

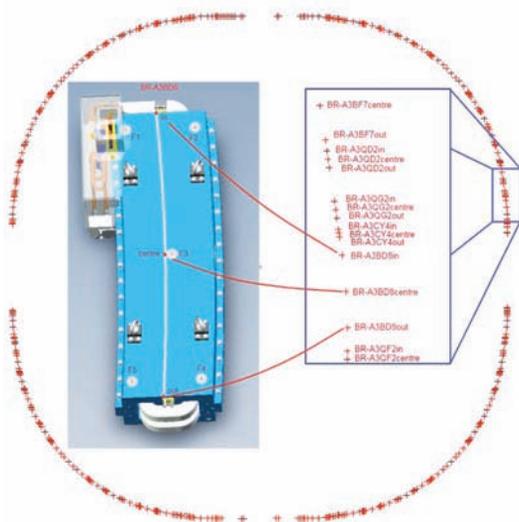


Рисунок 4.7 Расположение элементов
 на проектной орбите бустера.

Для каждого элемента выполняется ориентирование измерений занесенных в паспорт к проектным координатам орбиты, по уникальным именам и координатам X, Y, Z трех точек (вход, середина, выход) таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений была минимальна. Вместе с орбитой трансформируются все результаты обмеров внешних геодезических знаков. После сборки получаем проектный каталог координат всех измеренных точек на магнитных элементах в проектной структуре бустера.

Сборка всего кольца с окончательной выставкой элементов на гирдерах в системе координат бустера была произведена в Новосибирске. Размер площадки на которой была выполнена сборка 10x10 метров. Напомним, что периметр кольца 158.39 метра.

На гирдер устанавливаются все элементы. Юстировочные узлы предварительно установлены в среднее положение. При помощи лазерного трекера API Laser Tracker 3 выполняется съемка геодезических знаков на магнитных элементах (дипольные магниты и квадрупольные линзы). Измеренные координаты геодезических знаков на магнитных элементах накладываются на проектный каталог координат, таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений была минимальна. Этой манипуляцией мы привели API Laser Tracker 3 в проектную систему координат. Так как элементы были просто собраны на гирдере в среднем положении юстировочных узлов, то отклонения их от проекта может достигать 1 мм и более. Переводим лазерный трекер в режим показывающий отклонения от проектных координат и с помощью юстировочных винтов на гирдере устанавливаем элементы окончательно на проектные координаты. Из-за конструктивных особенностей для каждого гирдера приходилось делать 2 станции API Laser Tracker 3, рисунок 4.8. После фиксации

юстировочных винтов выполнялась исполнительная съемка элементов установленных на гирдере. Для контроля выполнялось наложение всех выставленных элементов на проектный каталог координат, если среднеквадратическое отклонение превышало 0.1 мм юстировка повторялась.

Готовые гирдерные сборки упаковывались и отправлялись в США. На месте выполнялась проверка взаимного положения элементов на гирдере. В результате выяснилось, что за время транспортировки элементы не изменили своего положения, что позволило быстро смонтировать кольцо бустера устанавливая только гирдера целиком.

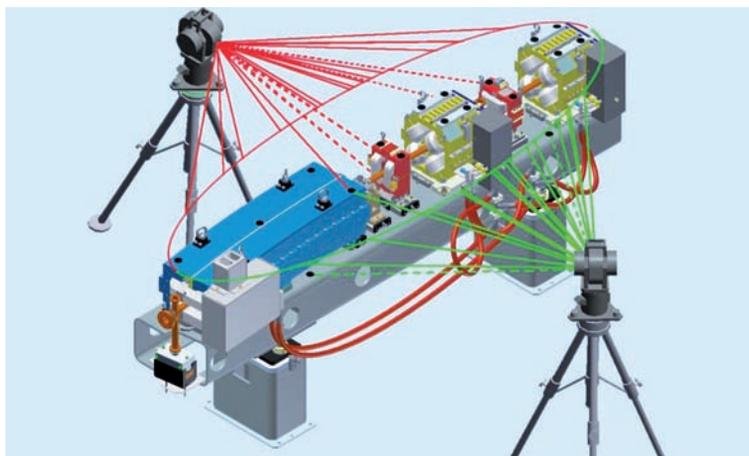


Рисунок 4.8 Измерения магнитных элементов на гирдере

6 | ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ УСКОРИТЕЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

6.1 Учет природы возникновения гармонических колебаний частиц УНК

Технологический процесс работы ускорительно-накопительного комплекса протекает в гармоническом режиме.

Для циклических ускорителей в устойчивой периодичной фокусирующей системе частица совершает колебания около положения равновесной орбиты. Поперечные колебания частиц называют бетатронными, а число этих колебаний на длине оборота ν -бетатронной частотой. Анализ показывает, что в кольцевых ускорителях неидеальности поля приводят к раскачке колебаний и возникновению поперечных резонансов. Поэтому возмущение, вызванное ошибкой установки магнитных элементов не должно содержать гармонических функций с частотами, близкими к частоте бетатронных колебаний.

Бустер NSLS-II имеет периметр орбиты 158,4 м. и расчетную бетатронную частоту $\nu=9,645$. Расчет спектральной чувствительности структуры бустера показывает, что 10-я гармоника наиболее критична для работы ускорителя, рисунок 4.9. Длина бетатронной волны и длина волны 10-й гармоники для структуры бустера составит около 16 м. Если создать для бустера модуль с магнитной структурой, где целое число элементов периодичности укладывается на длине волны бетатронных колебаний, это будет единичная структура. Тогда весь ускоритель можно представить из единич-

ных участков и неединичного участка для получения нецелого ν . Траектория ускорителя установленная из единичных участков может позволить существенно снизить требования к положению магнитной структуры относительно расчетной равновесной орбиты.[49]

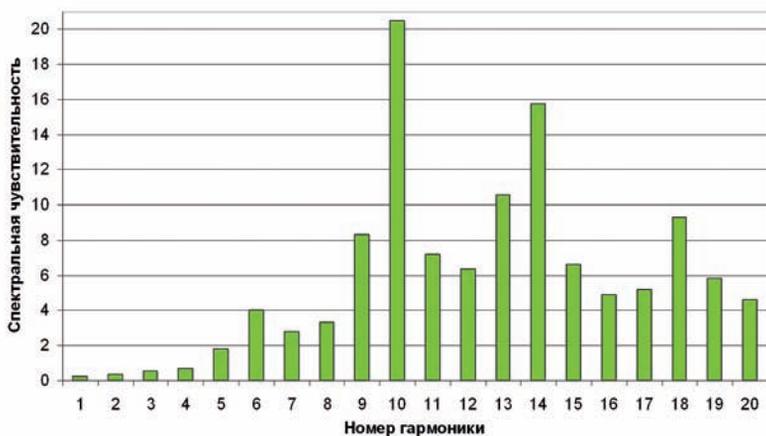


Рисунок 4.9 – Спектральная чувствительность магнитной структуры бустера NSLS-II

Длина магнитной структуры бустера, расположенной на четырех модулях составит около 16 м, тогда при относительной юстировке этих модулей с точностью $\sim 0,15$ мм. их можно принять близкими к единичной структуре. Движение частицы из точки 0 с нулевым углом и координатой относительно идеальной орбиты сформирует искаженную равновесную орбиту, точно проходящую через точки совмещения концов единичных участков, рисунок 4.10. Искажение орбиты внутри участков определяется их углом к идеальной орбите, а максимальное искажение относительно оси участка определяется как

$$y_{\max} = \frac{S_i - S_{i-1}}{2\pi} \quad (4.7)$$

Так как допустимые искажения составляют около 2 мм., величины могут быть около 10 мм. При этом концы единичных участков должны быть совмещены с точностью ~ 0,1 мм. [49]



Рисунок 4.10 – Схема построения структуры бустера из единичных участков, состоящих из четырех модулей

В случае подхода к юстировке как обычной структуры модульный способ сборки также сохраняет преимущества высоких положительных коэффициентов корреляции ошибок юстировки, т.к. на длине модуля укладывается $\sim \frac{1}{4} \lambda_{\text{бет}}$.

Сглаживающая кривая должна так аппроксимировать результаты измерений, чтобы число необходимых подвижек элементов было минимальным и, что более существенно, вызывать наименьшие искажения орбиты. Сглаживающая кривая строится как сумма гармоник Фурье, к которым магнитная структура наименее чувствительна. Спектральная чувствительность γ_k к гармонике возмущения k есть наи-

большая величина относительного отклонения искаженной замкнутой орбиты при воздействии возмущения с единичной амплитудой [30]. Если возмущение это сумма n гармонических функций, тогда оценка максимального искажения будет:

$$y_{\max} = \sum_{k=1}^n (\gamma_k a_k), \quad (4.8)$$

Гармонику следует считать критичной, если произведение амплитуды гармоник 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 гармоник должно выполняться равенство: $a_k \leq 0.1 y_{\text{дон}} / \gamma_k$.

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

$$a_k = \sqrt{c_k^2 + b_k^2}, \quad (4.9)$$

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;

S_i – текущая продольная координата точки i .

Далее для получения сглаживающей кривой нужно последовательно суммировать гармоники с номерами $k=0,1,2,\dots$, одновременно вычисляя сумму, пока расчетное искажение орбиты не превысит допустимое. Полученная сумма некритичных гармоник сформирует сглаженную кривую.

Спектральная чувствительность бустера NSLS-II показана на рисунке 4.9, а на рисунке 4.11 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 погрешностей определения плановых координат имеют наибольшие значения при $k=0,1,2$.

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. Максимальное допустимое искажение орбиты $y_{дон} = 2$ мм; допуск на амплитуду

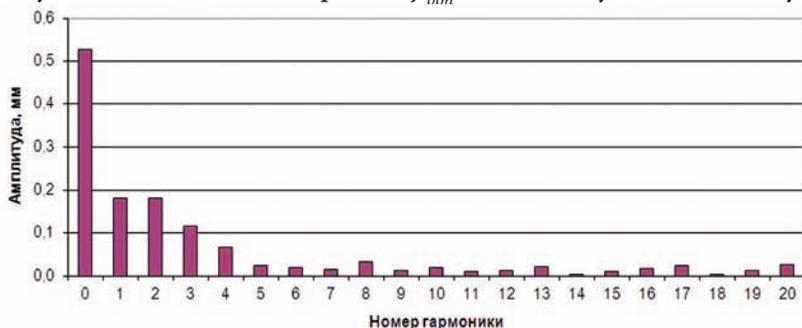


Рисунок 4.11 – Спектральный состав погрешностей определения плановых координат во вторичной сети бустера NSLS-II

ды 1 и 2 гармоники составит; $a_1=0.1 \times y_{дон} / \gamma_1 = 0.1 \times 2 / 0.2 = 1$ мм и $a_2 = 0.1 \times 2 / 0.3 = 0.67$ 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 искаженной орбиты, рисунок 4.12.

Гармоника № 6 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 разностные, включать в состав сглаживающей кривой рекомендуется только гармоники до первой критичной. Следовательно, сглаживающая кривая может включать в себя гармоники с нулевой по пятую включительно.

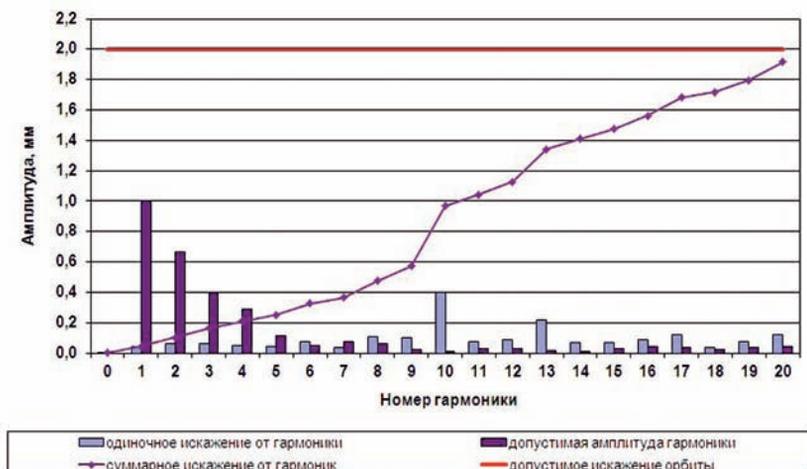


Рисунок 4.12 – График зависимости искажений орбиты бустера NSLS-II от гармоник возмущения, вызванных погрешностями юстировки

6.2 Моделирование 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 именовются 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 4.13.

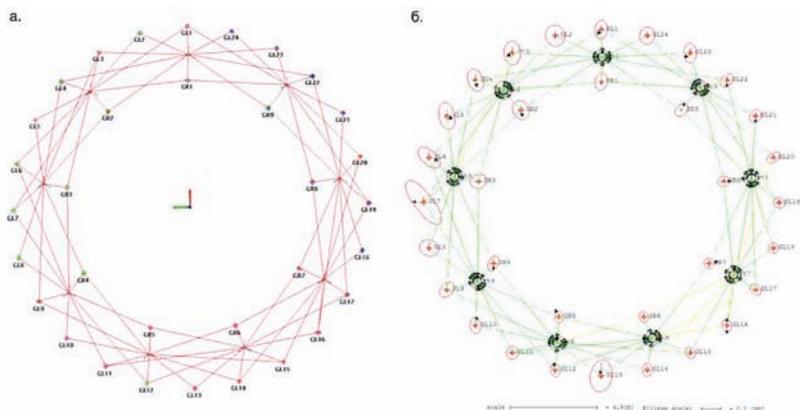


Рисунок 4.13 – Схема измерений сети периметром 52,5 м:
а) в программном продукте Spatial Analyzer;
б) в программном продукте PANDA

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 геоде-

зических знаков – 94. Количество станций лазерного трекера – 27.

Уравнивание в Spatial Analyzer 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 4.1.

Таблица 4.1

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. 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. СКП высотного положения по результатам уравнивания в SA отно-

сительно 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.

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

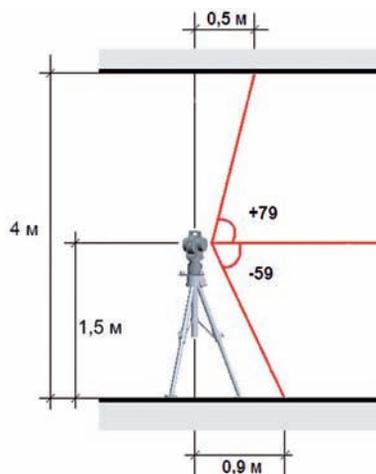


Рисунок 4.14 – Недоступные зоны измерений вертикального угла лазерного трекера API для выбранной высоты тоннеля 4 м

вставок. Габариты тоннеля: высота 4 м, ширина 3 м, радиус внутренней стены 43,5 м, радиус внешней стены 46,5 м.

Для используемых в ИЯФ СО РАН лазерных трекеров фирмы API диапазон измерения вертикального угла относительно горизонта прибора + 79° и - 59°. Это обуславливает наличие недоступных зон для производства измерений. Размеры зон для тоннеля высотой 4 м указаны на рисунке 4.14.

Произведен расчет проектных координат для трех вариантов сети по алгоритму, рассмотренному в главе 4. 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 [38]. Характеристики проектируемых сетей представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

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 4.15.

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.



Рисунок 4.15 – Графическое отображение в Spatial Analyzer смоделированных измерений для варианта сети № 1 с шагом между станциями 10 м

Для удобства анализа СКП все результаты были рассмотрены в цилиндрической системе координат. На графиках представлены отклонения измеренных значений положения геодезических знаков сети по радиальному и вертикальному направлениям до уравнивания и после, рисунки 4.16, 4.17.

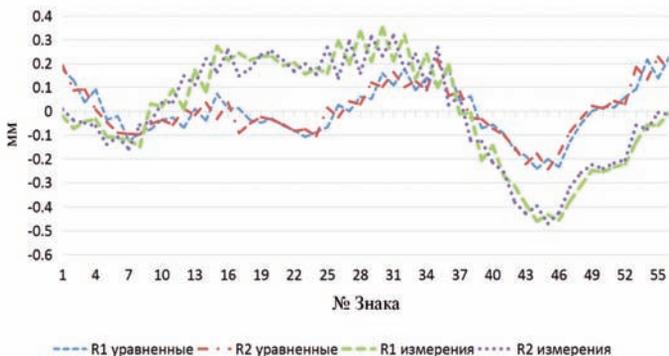


Рисунок 4.16 – График радиальных отклонений от проектных для варианта сети № 1, где R1 уравненные – для знаков внешнего радиуса тоннеля после уравнивания; R2 уравненные – для знаков внутреннего радиуса; R1 измеренные – для знаков внешнего радиуса тоннеля до уравнивания; R2 измеренные – для знаков внутреннего радиуса до уравнивания



Рисунок 4.17 – График отклонений по Z координате от проектных для варианта сети № 1

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

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 до и после уравнивания, рисунки 4.18–4.21.

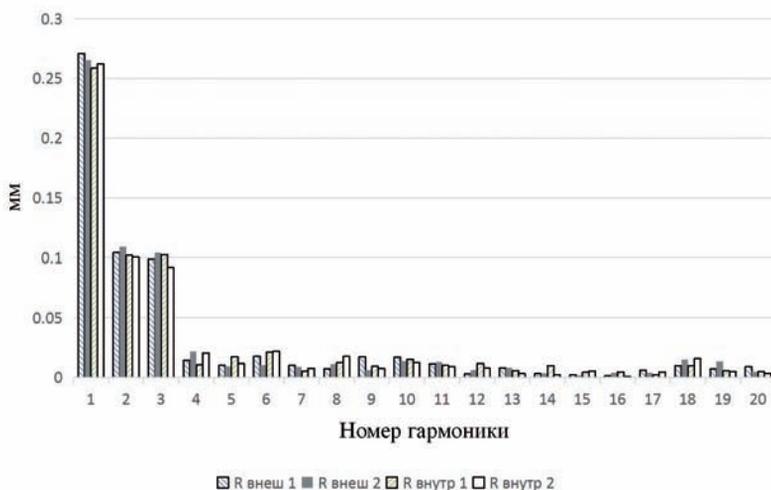


Рисунок 4.18 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в радиальном направлении до уравнивания, где $R_{\text{внеш } 1}$, $R_{\text{внеш } 2}$ – знаки, принадлежащие внешнему радиусу тоннеля с высотными отметками +0,5 и +2,5 м; $R_{\text{внутр } 1}$, $R_{\text{внутр } 2}$ – на внутреннем радиусе с высотными отметками +2,5 и +0,5 м

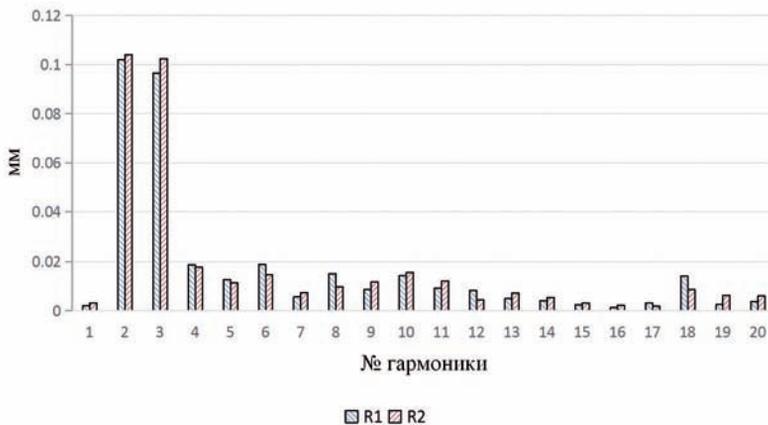


Рисунок 4.19 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в радиальном направлении после уравнивания, где R_1 – все знаки на внешнем радиусе, R_2 – на внутреннем радиусе

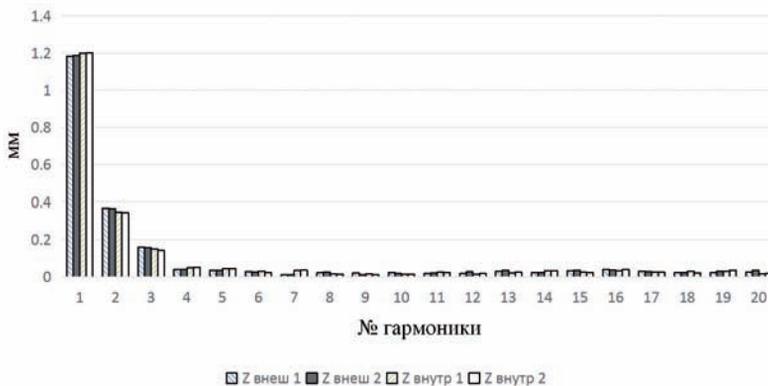


Рисунок 4.20 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в вертикальном направлении до уравнивания, где $Z_{\text{внеш } 1}$, $Z_{\text{внеш } 2}$ – знаки, принадлежащие внешнему радиусу тоннеля с высотными отметками +0,5 и +2,5 м;
 $Z_{\text{внутр } 1}$, $Z_{\text{внутр } 2}$ – на внутреннем радиусе с высотными отметками +2,5 и +0,5 м

Схема геодезических измерений сети лазерным трекером для варианта № 2 представлена на рисунке 4.22.

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.

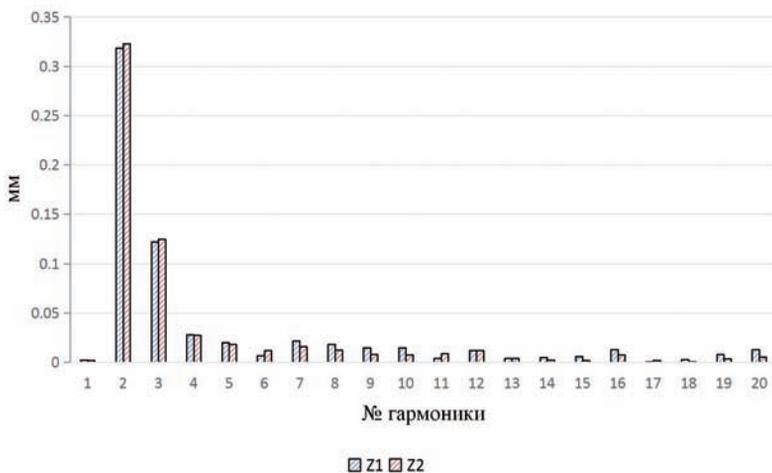


Рисунок 4.21 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков в вертикальном направлении после уравнивания, где Z_1 – все знаки на внешнем радиусе, Z_2 – на внутреннем радиусе

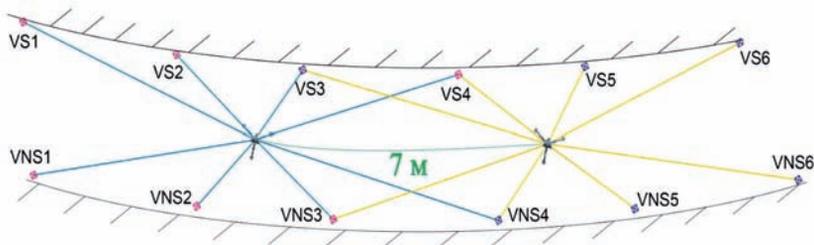


Рисунок 4.22 – Схема измерений проектируемой сети, вариант № 2

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 4.23, 4.24.



Рисунок 4.23 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для радиального направления варианта сети № 2

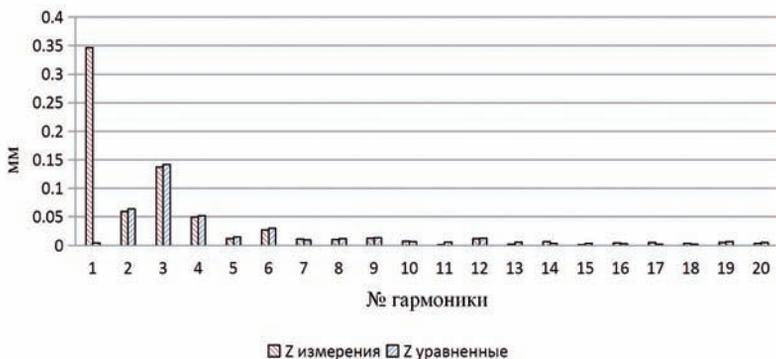


Рисунок 4.24 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для вертикального направления варианта сети № 2

Схема измерений сети лазерным трекером для варианта № 3 представлена на рисунке 4.25.

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.

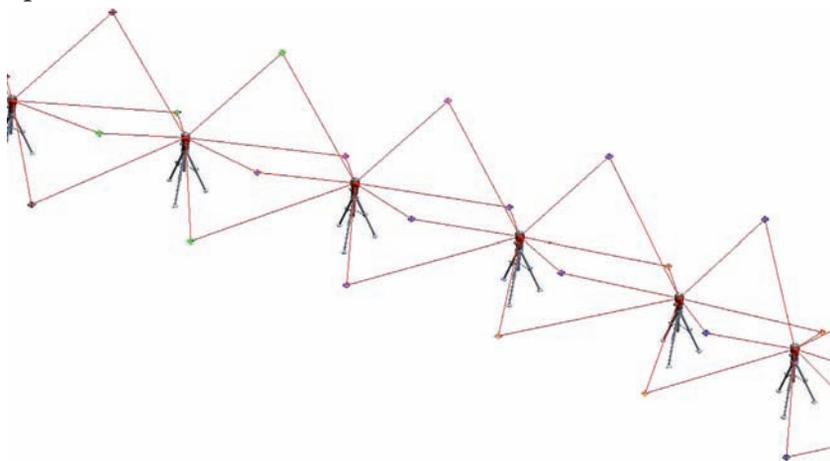


Рисунок 4.25 – Графическое отображение в *Spatial Analyzer* смоделированных измерений для варианта сети № 3 с шагом между станциями 3 м

Максимальные величины амплитуд для радиального направления включают первые три гармоники, как и в предыдущих вариантах, рисунок 4.26. Для Z $a_k \geq 0,05$ мм, где $k = 1, 2, 4, 5$, рисунок 4.27.

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



Рисунок 4.26 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для радиального направления варианта сети № 3



Рисунок 4.27 – График спектрального состава погрешностей измерений знаков сети для вертикального направления варианта сети № 3

диаметрально противоположных сторонах периметра сети. Из таблицы 4.3 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.

Таблица 4.3

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

6.3 Проектирование специальной геодезической сети источника синхротронного излучения четвертого поколения 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. 4.28.

Линейный ускоритель предназначен для формирования последовательности пучков электронов требуемой интенсивности и модуляции. Проектирование линака базируется

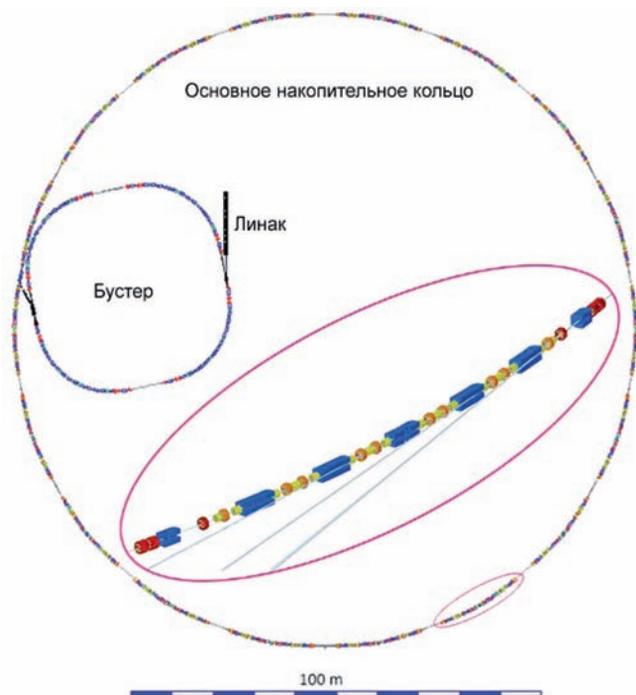


Рисунок 4.28 – Концептуальная схема основных компонентов источника СИ СКИФ с изображением одного суперпериода магнитной структуры основного кольца

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 4.29.

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.

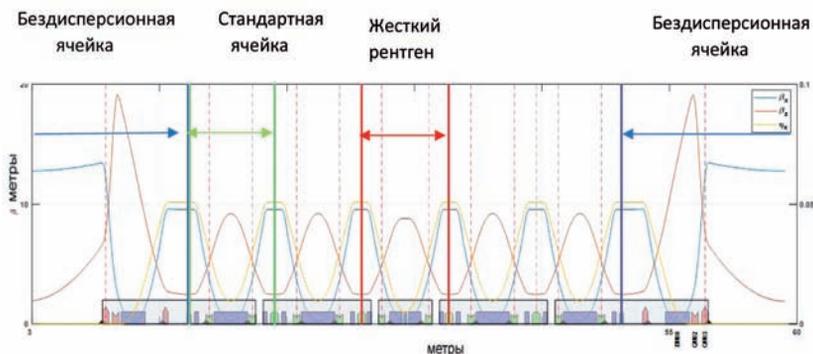


Рисунок 4.29 – Суперпериод с указанием оптических функций

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 4.4.

Таблица 4.4

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 макси-

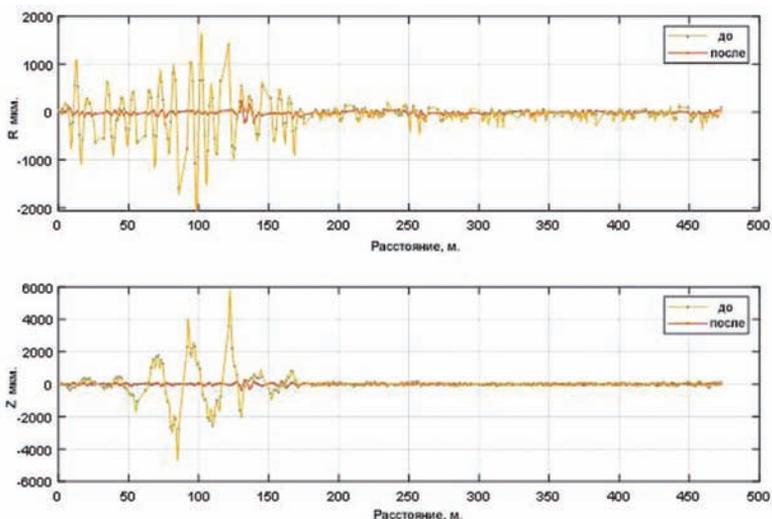


Рисунок 4.30 – Расчет эффективности работы алгоритма коррекции орбиты после захвата пучка частиц в основном кольце в радиальном и высотном направлениях

мальные 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 4.30.

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.

6.4 Реализация методики геодезического обеспечения для источника СИ четвертого поколения СКИФ

На основании полученных данных и САД-модели суперпериода были произведены расчеты 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 являет-

ся орбитой пучка в первом приближении. Относительно нее выбирается положение станций лазерного трекера.

Параметры проектных данных специальной геодезической сети СКИФ указаны в таблице 4.5. 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 4.5

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

Таким образом, выбранный радиус измерений со станции позволяет контролировать положение элементов практически

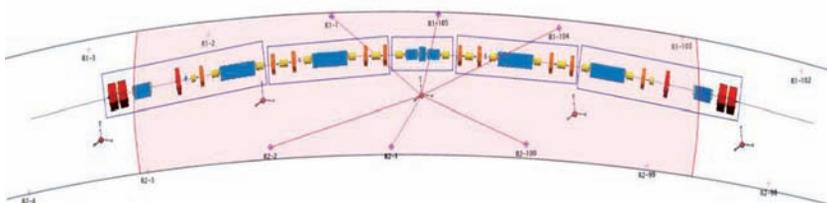


Рисунок 4.31 – Схема измерений со станции лазерного трекера для монтажа гирдерных модулей источника СИ СКИФ

ски 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, 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 4.32. Измерения с трех станций лазерного трекера перекрывают длину одного суперпериода.

Отклонения от проектных координат по радиальному направлению – 0,32 мм, по вертикальному – 0,13 мм, таблица 4.5. Гармонический анализ результатов приведен на рисунках

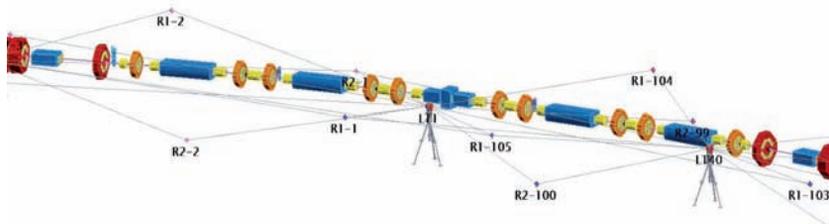


Рисунок 4.32 – Схема измерений геодезической сети СКИФ
основного кольца

4.33, 4.34. СКП ориентирования станции для проведения работ установки в проектное значение гирдерных модулей по б знакам сети 0,015 мм.

При наличии всех необходимых проектных данных тоннеля и магнитной структуры ускорителя появится возможность определить зону расположения знаков на внешней стене тоннеля, рисунок 4.3.

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 отра-

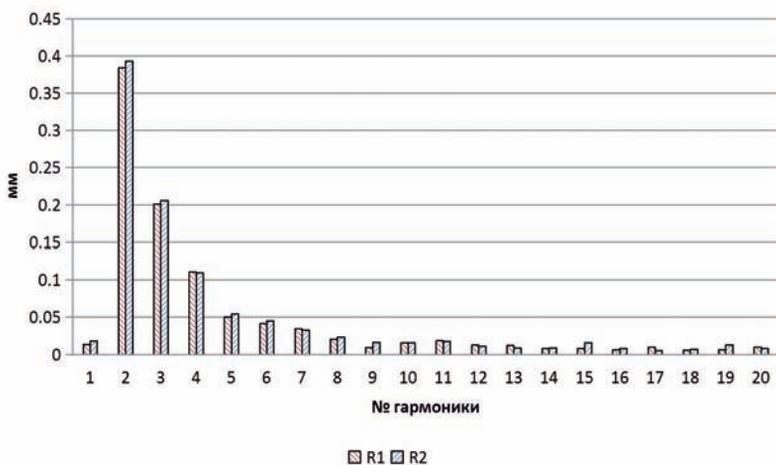


Рисунок 4.33 – График спектральной чувствительности предложенного варианта сети источника СИ СКИФ для радиального направления, где R_1 – знаки, принадлежащие внешнему радиусу; R_2 – знаки, принадлежащие внутреннему радиусу

жатель 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).

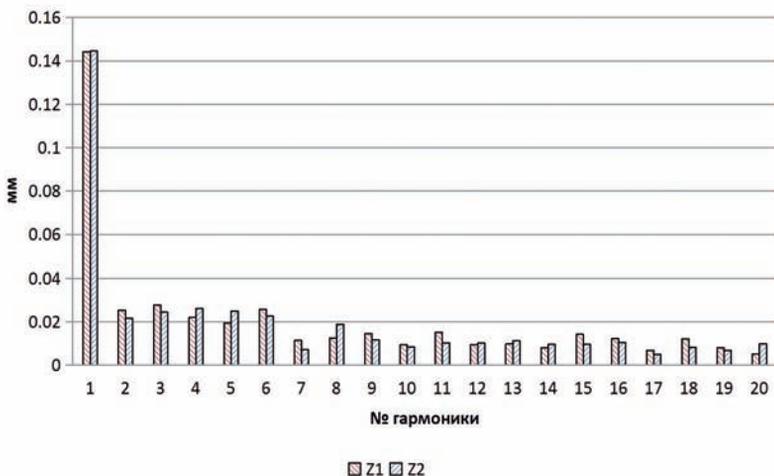


Рисунок 4.34 – График спектральной чувствительности предложенного варианта сети источника СИ СКИФ для вертикального направления, где Z_1 – знаки, принадлежащие внешнему радиусу; Z_2 – знаки, принадлежащие внутреннему радиусу

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

7 | ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

7.1 Цели геодезического мониторинга

Наблюдения за деформациями уникальных сооружений занимают значительное место в современной практике высокоточных инженерно-геодезических работ [19, 22, 28, 50, 60, 62, 64, 65]. Для крупных инженерных сооружений, имеющих высокие требования к пространственному положению технологического оборудования и как следствие к стабильности положения строительных конструкций, должен быть организован геодезический мониторинг, как на стадии строительства, так и в период эксплуатации [33, 37, 40, 66, 74]. Только комплексный подход к геодезическому мониторингу позволяет выявить тенденции и определить величины смещений конструкций сооружений, что в свою очередь дает возможность принимать необходимые технические решения при эксплуатации уникального оборудования и осуществлять прогнозирование «поведения» несущих тоннелей на период проведения научных экспериментов. Геодезический мониторинг деформационных процессов является одной из форм изучения состояния инженерных объектов, которая определяется тремя составляющими: наблюдение, оценка, прогноз [12]. Целями проведения геодезического мониторинга в конечном счете является:

- оценка рисков, связанных с развитием процессов деформации сооружений и прилегающей к ним территории;
- поиск ранних предвестников возможных катастрофических деформационных процессов, могущих привести к

утрате объекта или к созданию препятствий к нормальной эксплуатации сооружений [66].

Мировая практика эксплуатации УНК показывает, что даже при «идеальной» начальной юстировке магнитных элементов через некоторый промежуток времени требуется повторение юстировки оборудования. Оценку долговременных смещений дает эмпирический закон по формуле

$$dX^2 = A \times T \times L, A \approx 10^{-4} \text{ мкм}^2 / (\text{с} \times \text{м}), \quad (5.1)$$

где T – время за которое два участка тоннеля, находящиеся на расстоянии L , переместятся относительно друг друга на величину dX , которая в среднем по времени и пространству равна 0, а ее дисперсия подчиняется этому закону. Константа A зависит от места и глубины залегания тоннеля [67]. Применение этого закона на стадии проектирования УНК позволяет получить приблизительные оценки долговременных смещений оснований тоннелей. На практике стабильность пространственного положения УНК очень зависит от геологических характеристик грунтов, находящихся в основании тоннелей, и природных и техногенных факторов реализующихся на площадке строительства. Так для линейного тоннеля ВЭПП-5 оценка по эмпирической формуле (5.1) даёт период в 15 месяцев между циклами юстировки, а геодезический мониторинг тоннеля определяет этот период не более 10 месяцев. Геодезический мониторинг деформаций оснований тоннелей дает реальные данные для определения периода между юстировками физического оборудования ускорителей.

7.2 Спектральное представление деформационных процессов несущих сооружений ускорителей заряженных частиц

Для кольцевых несущих тоннелей ускорителей с периметрами в несколько сотен метров анализ вертикальных смещений по результатам геодезических наблюдений на основе графика осадок можно считать недостаточно информативным. Так как он не позволяет в полном объеме определить тенденции изменения жесткости в конструкции тоннеля на участках различной протяженности. Т.е. на графике практически невозможно выделить из величины реализованного вертикального смещения знака сети составляющие, относящиеся к различным в масштабе объекта деформациям.

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. Для реализации представления вертикальных деформаций в спектральном виде на практике выполняется следующее. Проводится цикл геодезических измерений по определению высотного положения знаков сети. Измерения обрабатываются, находят отклонения высотных отметок от средней отметки в данном цикле ΔH_i , далее вычисляются амплитуды гармоник, т.е. проводится Фурье-анализ результатов:

$$a_k = \sqrt{\left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \cos\left(\frac{2\pi k S_i}{P}\right)\right)^2 + \left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i \sin\left(\frac{2\pi k S_i}{P}\right)\right)^2}, \quad (5.2)$$

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 5.1. Точность определения величины амплитуд гармоник с учетом корреляции определения превышений между знаками в высотной геодезической сети ВЭПП-4м представлены на графике, рисунок 5.2.

Для анализа результатов, представленных на графике, рисунок 5.1, следует периметр тоннеля разделить на номер гармоники и получить протяженность участка, на котором

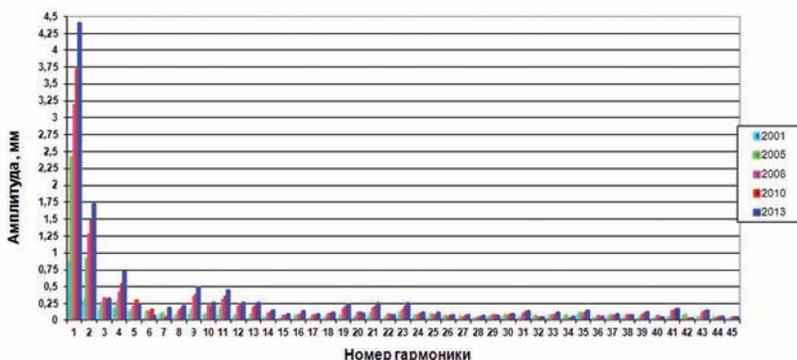


Рисунок 5.1 – Спектральный состав вертикальных деформаций тоннеля ВЭПП-4м

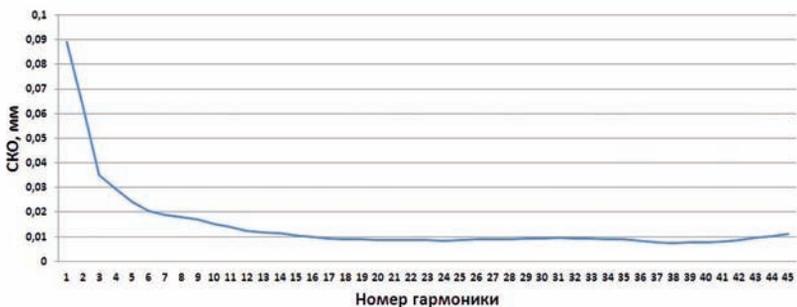


Рисунок 5.2 – Точность определения величины амплитуд гармоник

реализуется вертикальное смещение, аппроксимируемое гармонической функцией. На графике видно, что характер спектрального состава вертикальных деформаций сохраняется от цикла к циклу, но в среднем растут амплитуды. Реализуется наклон кольцевого тоннеля как целого (первая гармоника). Формируется наклон полуколец в форме «раскрытой книги» (вторая гармоника). Пики присутствующие на четвертой, девятой и одиннадцатой гармониках, показывают взаимную разнонаправленность вертикального смещения участков тоннеля протяженностью соответственно около 46, 20 и 17 м. т.е. локальные изменения жесткости конструкции тоннеля. Половина длины волны девятой гармоники близка по протяженности участкам тоннеля расположенным между температурными швами. Для одиннадцатой гармоники просматривается связь с образовавшимися трещинами блоков тоннеля.

Аппроксимация результатов наблюдений цикла 2013 г гармониками наиболее выраженными в спектральном составе показана на рисунке 5.3. В таком виде представления удоб-

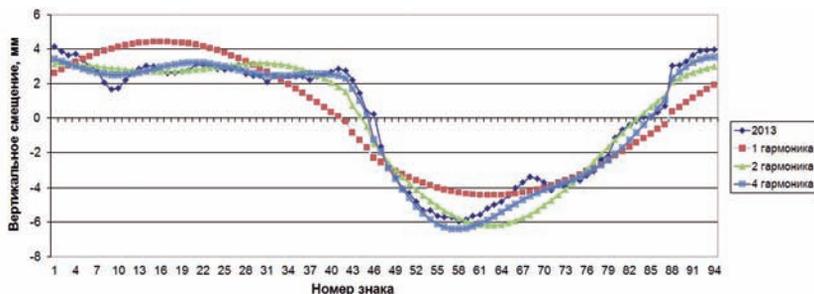


Рисунок 3.17 – Аппроксимация результатов наблюдений цикла 2013 года несколькими гармониками

но отслеживать локализацию вертикальных смещений по конкретным гармоникам.

С точки зрения контроля сохранения жесткости конструкции тоннеля важно оценить, на сколько критичны происходящие деформации. Если принять, что предельная относительная растяжимость бетона при изгибе равна около 0,1 мм/м., то в пересчете на стрелку прогиба это составит около 6 мм. Данные величины определяют полное разрушение бетона, тогда как трещинообразование начинается при величинах в 3-4 раза меньших в зависимости от марки бетона [59]. Отношение величины амплитуды гармоники к $\frac{1}{4}$ части длины ее волны, есть величина относительного вертикального смещения. Следовательно, сумма относительных вертикальных смещений по всем гармоникам, начиная со второй, есть максимально возможная величина для реализации в данном цикле относительной вертикальной деформации $Dz_{\text{омн}}$ кольцевого тоннеля:

$$Dz_{\text{омн.}} = \sum_{k=2}^n \frac{a_k 4k}{P}, \quad (5.3)$$

где a_k – амплитуда гармоники;

P – периметр тоннеля;

n – число гармоник;

k – номер гармоники.

Для ВЭПП-4м при $n=45$ относительная вертикальная деформация $Dz_{\text{омн}}$ достигает 1,4 мм это около 23 % от предельной величины, что можно интерпретировать как потерю жесткости в конструкции тоннеля приблизительно на тоже количество процентов.

Применение предлагаемого подхода параллельно с анализом вертикальных смещений тоннеля решает задачу оценки влияния этих смещений на вертикальное искажение орбиты ускорителя. В современной практике эксплуатации для каждого конкретного ускорителя определяется спектральная

чувствительность его магнитной структуры к изменению ее геометрических параметров относительно расчетных. 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. Большинство кольцевых ускорителей имеют малые величины коэффициентов спектральной чувствительности к низким гармоникам. В данном методе анализа вертикальных деформаций тоннеля ВЭПП-4м нулевая гармоника (изменение плоскости относимости) не рассматривается, что в практическом применении дает возможность более длительное время сохранять положение физического оборудования ускорителя в пределах рабочего диапазона юстировочных узлов.

Развитие осадок прогнозируется экспоненциальной моделью:

$$H = H_0(1 - e^{-t/\tau}), \quad (5.4)$$

где H_0 – конечная осадка;

t – текущее время от начала прогноза;

τ – время затухания осадки [30].

Использование в геодезическом сопровождении эксплуатации ускорительных комплексов гармонического анализа для оценки вертикальных деформаций кольцевых тоннелей позволяет совместно с традиционным представлением более полно отслеживать деформационные процессы, развивающиеся на территории ускорительного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокоточные лазерные системы, лазерные трекеры и другие находят широкое применение в самых различных технологических областях экономики, как в РФ так и за рубежом. Кроме геодезического обеспечения строительства ускорительно-накопительных комплексов, в полной мере это можно отнести к самолетостроению, к строительству современных подводных и надводных судов, автомобилестроению и других. Нередко, работает принцип, чем современной и технологичней продукт, тем более высокие требования предъявляются к точности его изготовления и монтажа.

В монографии показано, что тех рекомендаций, которые даны в руководствах к лазерным приборам, в периодической научной литературе недостаточно для достижения требуемой точности монтажа уникального физического оборудования. Обоснована и показана на практических примерах необходимость и целесообразность проведения дополнительных исследований для определения точностных параметров лазерных трекеров, возможность их применения на этапах изготовления магнитных элементов ускорительно-накопительных комплексов, монтажа технологического оборудования и геодезического пространственного мониторинга в процессе эксплуатации установок.

Представлены разработанные методики и практические результаты научных исследований, выполненные авторами на ускорительно-накопительных комплексах ИЯФ СО РАН, а так же в ходе выполнения работ по международным контрактам; по созданию и эксплуатации Большого Адронного Коллайдера (LNS) в Швейцарии, бустера NSLS-II Брукхей-

венской лаборатории (США), в производстве дипольных магнитов для медицинского центра ионной терапии в Gumma University (Япония), 24-х дипольных магнитов синхротрона MBH-C (Австрия), при модернизации и создании новой специальной геодезической сети для Бустер коллайдера NICA в Объединенном институте ядерных исследований, г. Дубна, в Европейском синхротроне (ESRF) в г. Гренобле, Сибирского кольцевого источника фотонов синхротронного излучения 4-го поколения (СКИФ), в Новосибирске и других.

В качестве основных научных результатов, представленных в монографии выделим;

– разработку методики геодезического обеспечения стадий создания УНК, с учетом технологических связей с элементами согласования в пространстве и времени процессов создания физического оборудования и строительства сооружений для его размещения;

– разработана и реализована методика геодезического обеспечения УНК для модульного принципа сборки и монтажа физического оборудования на гирдерах, что позволяет вести строительство тоннеля и монтаж оборудования в параллельном режиме с существенным сокращением сроков строительства;

– предложен алгоритм оценки максимальных относительных вертикальных деформаций кольцевых тоннелей ускорителей на основе гармонического анализа с оценкой изменений «жесткости» тоннеля с определением величин вертикальных деформаций на длине бетатронной волны, с выявлением максимально и минимально критичных нарушений заранее заданных допусков;

– разработана специальная методика работы лазерным трекером при геодезическом обеспечении изготовления магнитных элементов ускорителей с сопровождением магнит-

ных измерений с периодической юстировкой в проектное положение при эксплуатации УНК;

– предложен алгоритм определения коэффициентов, необходимых для настройки модуля проектирования специальной геодезической сети (Measurement Simulation) в программном продукте Spatial Analyzer на основе исследований о влиянии расстояний между прибором и отражателем на параметры эллипсоидов погрешностей;

– разработан алгоритм вычисления оптимальных для заданных условий геодезических измерений (углов и расстояний) при работе с лазерными трекерами на основе заданных, – допусков и радиуса проектной кольцевой оси;

– разработана методика геодезического обеспечения для установки элементов магнитной структуры источника синхротронного излучения 4- поколения СКИФ со средней квадратической погрешностью 0.07 мм для проектного радиуса 476 метров, с разработкой проекта создания специальной геодезической сети с оптимальным количеством определяемых пунктов и станций лазерного трекера.

Авторы осознают, что несмотря на значительный объем выполненных научных исследований по определению возможностей и эффективности геодезических измерений лазерными трекерами до их завершения, еще очень далеко, и мы находимся лишь в начале пути широкого внедрения в производство. Поэтому исследования в этой области весьма актуальны и несомненно должны быть продолжены.

Авторы будут благодарны всем за выявленные замечания, пожелания и рекомендации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2 Большаков, В. Д. Справочное руководство по инженерно-геодезическим работам [Текст] / В. Д. Большаков, Г. П. Левчук, В. Е. Новак. – М.: Недра, 1980. – 781 с.

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 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.

5 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.

6 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 ГЕОСибирь-2013: IX Междунар. Науч. конгр. :15–26 апр. 2013г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, карто-

графия, маркшейдерия», сб. материалов Новосибирск: СГГА, 2013. – Т.1, ч.1. – С. 128–132.

7 Геодезическое обеспечение эксплуатации промышленных предприятий [Текст] / В. Б. Жарников, Б. Н. Дьяков, Б. Н. Жуков и др. – М.: Недра, 1992. –160 с.

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

9 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 // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2002. – № 3. – С. 15–21.

10 Создание планового геодезического обоснования при строительстве УНК [Текст] / В. А. Горелов, Г. В. Глухов, Е. Д. Лавриненко // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2002. – № 3. – С. 3–14.

11 ГОСТ Р 55024-2012 Сети геодезические. Классификация. Общие технические требования [Текст]: Национальный стандарт Российской Федерации. М. Стандартинформ. 2014

12 ГОСТ 24842012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2014.

13 ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 12 с.

14 ГОСТ 21779-82 (СТ СЭВ 2681-80). Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Технологические допуски [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 22 с.

15 Гуляев, Ю. П. Прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным [Текст] / Ю. П. Гуляев // Геодезия и картография. – 1983. – № 12. – С. 17–21.

16 Ермаков, В. С., 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.

17 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.

18 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.

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

20 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.

21 Инженерная геодезия [Текст]: учебник 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.

22 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов [Текст]. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 226 с.

23 Исследование точностных характеристик дальнометров 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. – СГГА. – 2011. – С.9–12.

24 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.

25 Карлсон, А. А. О качестве высокоточного нивелирования короткими лучами [Текст] / А. А. Карлсон // Геодезия и картография. – 1986. – № 4. – С. 45–49.

26 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.

27 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.

28 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.

29 Карпик, А. П. Вычисление вероятнейшего положения оси тоннеля на круговой кривой [Текст] / А. П. Карпик Межвуз. сб.: Совершенствование методов инженерно-геодезических работ. – Новосибирск: НИИГАиК. –1988. – Вып. 37. – С. 67–73.

30 Коллайдеры и детекторы ИЯФ [Текст]: Научное издание / А. Н. Скринский, П. В. Логачев, Г. Н. Кулипанов и др. – Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2018. – 426 с.

31 Колмогоров, В. Г. Оценка пространственно-временных характеристик современной геодинамики Сибири

[Текст] / В. Г. Колмогоров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2012. – № 2/1. – С. 33–35.

32 Комар, Е. Г. Основы ускорительной техники [Текст] : учеб. пособие / А. А. Соколов, Е. Г. Комар. – М., 1975.

33 Кочетов, Ф. Г. Нивелиры с компенсаторами [Текст] / Ф. Г. Кочетов. – М.: Недра, 1985. – 148 с.

34 Лебедев, А. Н. Теория циклических ускорителей [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Лебедев. – М., 1962.

35 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.

36 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 ГУТК СССР, 1988. – 68 с.

37 Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов [Текст] / Ч. Лоусон, Р. Хенсон ; пер. с англ. – М.: Наука, 1986. – 232 с.

38 Мазуров, Б. Т. Анализ геодезических измерений с учетом динамики объектов мониторинга [Текст] / Б. Т. Мазуров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 2012. – № 2/1. – С. 18–21.

39 Маркузе Ю. И. Основы уравнительных вычислений [Текст] : учеб. пособие для геодез. спец. вузов / Ю. И. Маркузе. – М.: Недра, 1990. – 239 с.

40 Мещерский И. Н. Об ошибках высокоточного нивелирования [Текст] / И. Н. Мещерский // Геодезия и картография. – 1987. – № 7. – С. 48–52.

41 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.

42 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. / СГГА. – Новосибирск, 1999. – С. 89.

43 Наземное лазерное сканирование [Текст] : монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.

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

45 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.

46 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.

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

48 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.

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

50 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

51 О возможности изучения деформационного состояния земной поверхности по результатам повторного высокоточного нивелирования [Текст] / В. Г. Колмогоров, Г. Г. Астащенко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2012. – № 2/1, 2012. – С. 16–17.

52 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

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, 1999. – С. 90.

54 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, гео-

информатика, картография, маркшейдерия», сб. материалов в 3 т. – Новосибирск: СГГА, 2012. – Т.1. – С. 183–188.

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

56 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

57 Проект супер С-т фабрики в Новосибирске [Текст] Институт Ядерной Физики им. Г. И. Будкера СО РАН. – Новосибирск, 2011. – 156 с.

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

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

60 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.

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

62 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.

63 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.

64 Смалюк В. В., Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях [Текст] Под ред. Чл-корр. РАН Н. С. Диканского. Новосибирск, Параллель, 2009 – 294 с.

65 СНиП 3.01.03-84 Геодезические работы в строительстве [Текст]. – М.: Госстрой СССР, 1985.

66 СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции [Текст]. – М.: Госстрой СССР, 1987.

67 СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – <http://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/213/merged.pdf>.

68 СП 11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Дата введения 01.01.1998 – <http://docs.cntd.ru/document/871001219>

69 СП 11-104-97 Инженерно-геодезические изыскания для строительства [Текст]. – М.: ПНИИС Госстроя России, 1997.

70 СНиП 32-04-97. от 29.07.97 N 18-41 Тоннели железно-дорожные и автодорожные [Текст]. – М.: Госстрой России, 1998.

71 СТО РусГидро 01.01.133-2015 Гидроэнергетическое строительство. Инженерные изыскания при разработке схем территориального планирования и проектной документации. Нормы и требования. Издание официальное. 2015 - http://www.rushydro.ru/upload/iblock/cf8/047_STO-RusGidro-01.01.133-2015_Inzhenernie-iziskaniya.pdf

72 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.

73 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.

74 Создание 3D-модели участка перепускного канала Бу-стер-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

75 Судаков, С. Г. Основные геодезические сети [Текст]/ Судаков С. Г.//М., Недра, 1975, 368 с.

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

77 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

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

79 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.

80 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.

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

82 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. :

83 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.

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

85 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.

86 Фетисов Г. В., Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ [Текст]: М. ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 672 с.

87 Физический проект комплекса ВЭПП-5 [Текст]. – Новосибирск, 1995.

88 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. – 20с.

89 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.

90 Ямбаев, Х. К. Геодезический контроль прямолинейности и соосности в строительстве [Текст] / Х. К. Ямбаев. – М.: Недра, 1986. – 264 с.

91 Ямбаев, Х. К. Специальные приборы для инженерно-геодезических работ [Текст] / Х. К. Ямбаев. – М.: Недра, 1990. – 267 с.

92 API automated precision. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.apisensor.com>. – Загл. с экрана.

93 Allgemeine Vermessungs Nachrichten [Text] / W. Schwarz Die Justierung von Teilchenbeschleunigern. – Heft 1, 1990.

94 Bernardini, C. AdA: The First Electron-Positron Collider [Text] / Carlo Bernardini // Phis. perspect. – 2004. – 6. – P.156-183.

95 First experimental results at the high power free electron laser at Siberian Center for Photochemistry Research [Text] /

Antokhin E. A., Kiselev O. B., Polyanskiy A. V., et al // Preprint Budker INP 2003–53, Novosibirsk, 2003.

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

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

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

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

100 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.

101 Laser Tracker API T3 [Electronic resource] http://www.nevatec.ru/tracker3/files/tracker_api.pdf.

102 Laser Tracker API Radian [Electronic resource] <http://www.nevatec.ru/Radian/files/Radian.pdf>.

103 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.

104 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.

105 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. БАИТ. – 2012. – №4(80).

106 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.

107 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.

108 Status of NSLS-II booster [Electronic resource] / S. Gurov et al, //PAC'11, New-York, 2011, WEP201, p. 437. <http://www.JACoW.org>.

109 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.

110 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.

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

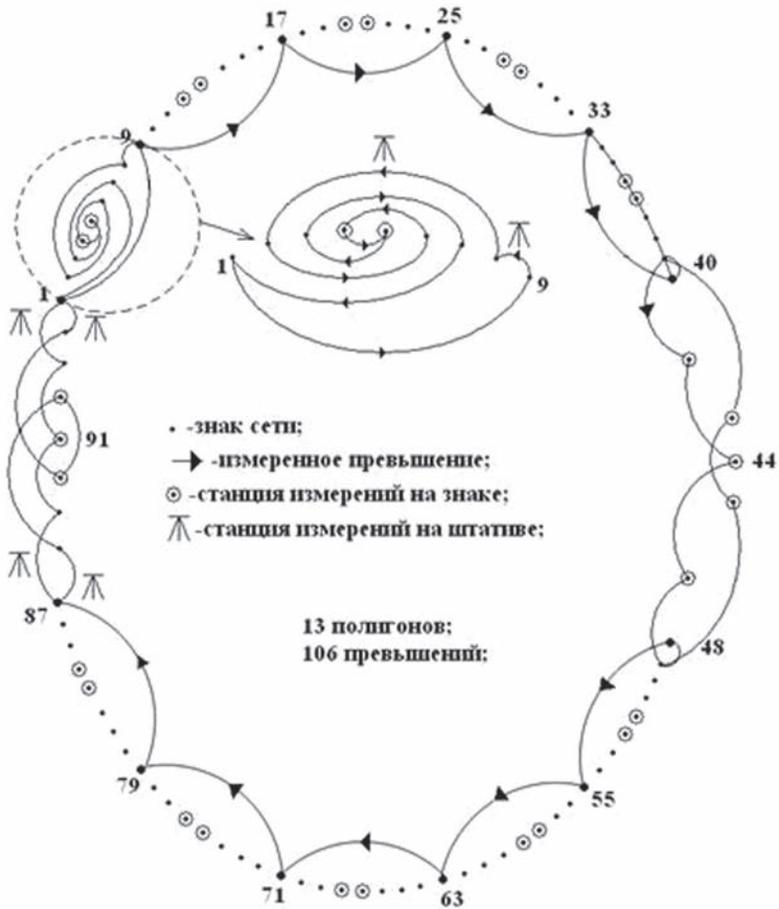


Схема геодезических измерений высотной сети ВЭПП-4м,
 разработанная Пупковым Ю. А., Левашовым Ю. И.,
 Мурзинцевым П. П.



Тренировочные измерения с помощью инварных лент и мерных жезлов ауд. 31 (НИИГАиК-СГГА-СГУГиТ)
Власенко А. В., Мурзинцев П. П., Боков М. А.

Точность измерения превышений, рассчитанная по невязкам полигонов из 16 циклов измерений, составляет $\sigma = 0,025$ мм. На рисунке 3.11 представлен график осадок тоннеля ВЭПП-4м за период 2001-2013 гг.

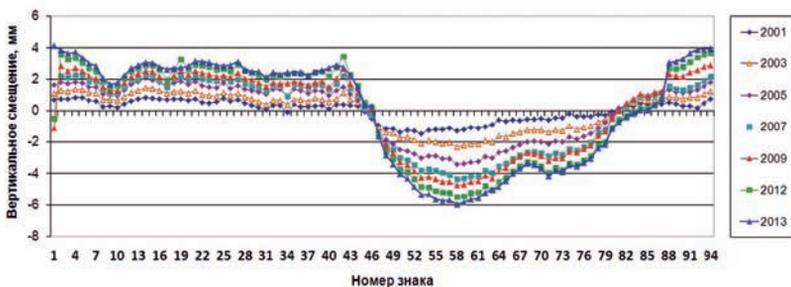


График осадок тоннеля ВЭПП-4м

Результаты циклов (2001-2013) геодезических измерений высотной сети ВЭПП-4м

Но- мер знака	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013
	Отметка, мм										
1	0,680	1,101	1,394	1,613	1,847		-1,333	-1,101	-0,826	-0,494	-0,148
2	0,735	1,277	1,558	1,798	2,088	2,219	2,552	2,818	3,120	3,566	3,883
3	0,724	1,238	1,491	1,701	1,968	2,129	2,414	2,528	2,847	3,283	3,651
4	0,856	1,385	1,609	1,803	2,029	2,245	2,564	2,711	2,937	3,372	3,739
5	0,835	1,340	1,586	1,776	1,975	2,191	2,430	2,524	2,731	3,037	3,375
6	0,638	1,161	1,355	1,516	1,673	1,854	2,110	2,186	2,374	2,675	2,992
7	0,603	1,121	1,348	1,485	1,669	1,834	2,013	2,019	2,282	2,491	2,828
8	0,268	0,717	0,935	1,050	1,156	1,299	1,401	1,492	1,687	1,841	2,064
9	0,313	0,682	0,899	0,990	1,051	1,104	1,160	1,259	1,443	1,474	1,668
10	0,233	0,645	0,856	0,979	0,995	1,115	1,209	1,282	1,534	1,586	1,747
11	0,431	0,896	1,146	1,315	1,396	1,490	1,699	1,764	2,005	2,080	2,212
12	0,630	1,129	1,471	1,663	1,760	1,878	2,126	2,151	2,363	2,529	2,676
13	0,738	1,254	1,644	1,853	1,978	2,038	2,374	2,353	2,583	2,681	2,856
14	0,851	1,433	1,848	2,056	2,143	2,245	2,569	2,518	2,746	2,888	3,056
15	0,808	1,395	1,779	1,961	2,074	2,157	2,522	2,475	2,713	2,857	3,006
16	0,736	1,279	1,646	1,802	1,815	1,903	2,239	2,146	2,438	2,613	2,735
17	0,719	1,117	1,344	1,516	1,438	1,483	2,006	1,835	1,925	1,943	2,022
18	0,729	1,176	1,588	1,762	1,810	1,969	2,246	2,210	2,452	2,591	2,643
19	0,739	1,239	1,635	1,833	1,911	2,175	2,430	2,536	3,119	3,272	3,421
20	0,640	1,111	1,489	1,659	1,745	2,004	2,267	2,308	2,521	2,631	2,803
21	0,762	1,263	1,628	1,834	1,922	2,211	2,389	2,530	2,744	2,895	3,112
22	0,544	1,001	1,330	1,604	1,751	2,039	2,225	2,367	2,573	2,845	3,095
23	0,494	0,980	1,248	1,504	1,627	1,918	2,069	2,290	2,494	2,783	3,034
24	0,567	0,933	1,144	1,465	1,607	1,890	1,996	2,172	2,331	2,614	2,881
25	0,795	1,130	1,444	1,775	1,762	2,067	2,286	2,204	2,405	2,640	2,837
26	0,627	0,959	1,123	1,411	1,495	1,836	1,980	2,104	2,247	2,519	2,869
27	0,711	1,100	1,241	1,575	1,730	1,996	2,184	2,402	2,610	2,906	3,103
28	0,501	0,872	1,077	1,382	1,506	1,704	1,914	2,033	2,316	2,525	2,596
29	0,360	0,731	0,958	1,280	1,420	1,557	1,727	1,918	2,184	2,389	2,471

Но- мер знака	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013
	Отметка, мм										
30	0,232	0,577	0,901	1,206	1,359	1,466	1,631	1,755	2,042	2,199	2,459
31	0,097	0,409	0,731	1,050	1,231	1,230	1,390	1,558	1,807	1,966	2,107
32	0,357	0,651	1,074	1,383	1,480	1,560	1,693	1,741	2,027	2,227	2,423
33	0,333	0,641	1,081	1,348	1,477	1,546	1,661	1,716	1,956	2,141	2,296
34	-0,102	0,371	0,753	0,880	0,870	0,939	1,892	1,740	1,958	2,295	2,420
35	0,411	0,747	1,131	1,376	1,461	1,659	1,835	1,834	2,075	2,363	2,431
36	0,260	0,717	1,037	1,274	1,407	1,569	1,826	1,762	2,015	2,343	2,422
37	0,238	0,557	0,899	1,104	1,259	1,442	1,671	1,614	1,895	2,206	2,219
38	0,287	0,776	1,057	1,276	1,431	1,609	1,879	1,768	2,073	2,425	2,437
39	0,330	0,700	1,008	1,232	1,428	1,632	1,833	1,850	2,210	2,486	2,540
40	0,105	0,552	0,784	0,962	1,152	1,344	1,431	1,506	1,698	2,170	2,191
41	0,387	0,763	1,051	1,285	1,498	1,715	1,741	2,006	2,167	2,741	2,868
42	0,375	1,131	1,309	1,511	1,918	2,185	2,126	2,629	2,851	3,446	3,752
43	0,334	0,717	0,940	1,035	1,179	1,393	1,426	1,717	1,814	2,257	2,237
44	0,325	0,526	0,591	0,674	0,707	0,902	0,980	1,162	1,202	1,594	1,463
45	-0,037	0,118	0,032	0,028	0,004	0,133	0,265	0,400	0,304	0,511	0,376
46	-0,481	-0,318	-0,364	-0,382	-0,275	-0,253	-0,182	0,098	-0,087	0,257	0,243
47	-0,953	-1,078	-1,277	-1,364	-1,464	-1,480	-1,415	-1,380	-1,602	-1,521	-1,646
48	-1,151	-1,376	-1,655	-1,875	-2,020	-2,199	-2,223	-2,281	-2,560	-2,606	-2,826
49	-1,151	-1,431	-1,815	-2,128	-2,288	-2,495	-2,606	-2,712	-2,999	-3,057	-3,388
50	-1,363	-1,735	-2,152	-2,486	-2,684	-3,019	-3,140	-3,273	-3,644	-3,722	-4,036
51	-1,236	-1,700	-2,163	-2,549	-2,738	-3,149	-3,304	-3,467	-3,813	-3,900	-4,300
52	-1,267	-1,843	-2,317	-2,737	-2,960	-3,457	-3,647	-3,845	-4,214	-4,350	-4,830
53	-1,456	-2,087	-2,593	-3,027	-3,281	-3,818	-4,027	-4,243	-4,646	-4,830	-5,336
54	-1,227	-1,919	-2,477	-2,864	-3,177	-3,738	-3,944	-4,187	-4,638	-4,855	-5,314
55	-1,211	-1,981	-2,541	-2,900	-3,263	-3,814	-3,976	-4,321	-4,699	-5,088	-5,649
56	-1,200	-2,080	-2,670	-3,071	-3,393	-3,947	-4,187	-4,507	-4,888	-5,166	-5,733
57	-1,104	-2,040	-2,654	-3,071	-3,343	-4,065	-4,117	-4,499	-4,850	-5,234	-5,714
58	-1,281	-2,308	-2,917	-3,388	-3,690	-4,334	-4,430	-4,734	-5,100	-5,469	-5,967
59	-1,197	-2,236	-2,916	-3,376	-3,667	-4,301	-4,370	-4,687	-5,058	-5,441	-5,856
60	-1,077	-2,148	-2,796	-3,283	-3,565	-4,166	-4,245	-4,527	-4,890	-5,223	-5,650
61	-1,106	-2,131	-2,776	-3,210	-3,467	-4,140	-4,176	-4,454	-4,803	-5,196	-5,578
62	-1,015	-1,890	-2,472	-2,918	-3,248	-3,806	-3,903	-4,105	-4,466	-4,784	-5,217
63	-0,902	-1,983	-2,585	-2,997	-3,364	-3,950	-4,034	-4,273	-4,584	-5,051	-5,415
64	-0,569	-1,602	-2,254	-2,665	-3,006	-3,522	-3,608	-3,831	-4,108	-4,521	-4,815
65	-0,687	-1,669	-2,146	-2,548	-2,798	-3,370	-3,505	-3,610	-3,864	-4,244	-4,468

Но- мер знака	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012	2013
	Отметка, мм										
66	-0,601	-1,478	-1,953	-2,339	-2,550	-3,066	-3,090	-3,207	-3,454	-3,830	-4,003
67	-0,610	-1,397	-1,785	-2,163	-2,331	-2,830	-2,861	-2,937	-3,171	-3,529	-3,683
68	-0,518	-1,265	-1,645	-1,974	-2,153	-2,637	-2,616	-2,719	-2,930	-3,290	-3,366
69	-0,550	-1,262	-1,615	-1,945	-2,130	-2,599	-2,598	-2,733	-2,948	-3,318	-3,461
70	-0,487	-1,232	-1,647	-2,011	-2,219	-2,691	-2,711	-2,895	-3,171	-3,526	-3,678
71	-0,569	-1,356	-1,687	-2,110	-2,385	-2,894	-2,953	-3,203	-3,506	-3,943	-4,155
72	-0,440	-1,238	-1,568	-1,969	-2,167	-2,690	-2,732	-2,991	-3,313	-3,632	-3,826
73	-0,459	-1,266	-1,657	-1,995	-2,257	-2,790	-2,783	-3,004	-3,335	-3,774	-3,884
74	-0,171	-0,966	-1,341	-1,667	-1,829	-2,440	-2,385	-2,598	-3,001	-3,353	-3,474
75	-0,372	-1,181	-1,517	-1,803	-1,978	-2,520	-2,441	-2,676	-3,052	-3,407	-3,556
76	-0,352	-1,078	-1,380	-1,656	-1,786	-2,302	-2,219	-2,431	-2,802	-3,123	-3,305
77	-0,358	-0,989	-1,235	-1,463	-1,612	-2,056	-1,963	-2,197	-2,509	-2,885	-3,048
78	-0,240	-0,734	-0,866	-1,098	-1,152	-1,406	-1,326	-1,575	-1,862	-2,192	-2,386
79	-0,265	-0,553	-0,586	-0,749	-0,922	-1,197	-1,097	-1,343	-1,521	-2,016	-2,176
80	-0,048	-0,177	-0,160	-0,244	-0,310	-0,521	-0,329	-0,438	-0,603	-1,056	-1,145
81	0,182	0,187	0,088	0,142	0,104	-0,018	0,127	0,032	-0,023	-0,555	-0,691
82	0,207	0,245	0,248	0,374	0,348	0,246	0,399	0,467	0,389	-0,306	-0,405
83	0,316	0,494	0,481	0,618	0,660	0,610	0,733	0,746	0,780	-0,042	-0,166
84	0,503	0,685	0,715	0,913	0,951	0,870	0,970	1,048	1,046	0,191	0,055
85	0,386	0,637	0,636	0,810	0,938	0,871	0,938	0,978	1,029	0,157	0,022
86	0,415	0,723	0,824	0,983	1,125	1,000	1,012	1,203	1,125	0,443	0,362
87	0,455	0,758	0,979	1,100	1,322	1,142	1,063	1,196	1,208	0,751	0,733
88	0,540	0,878	1,122	1,330	1,501	1,563	2,079	2,310	2,396	2,697	3,038
89	0,426	0,816	0,996	1,184	1,268	1,354	1,807	2,222	2,251	2,633	3,093
90	0,315	0,754	0,939	1,129	1,214	1,339	2,104	2,171	2,279	2,765	3,284
91	0,314	0,834	1,013	1,188	1,414	1,475	1,790	2,417	2,495	3,088	3,666
92	0,185	0,816	1,055	1,311	1,602	1,642	2,214	2,559	2,718	3,382	3,885
93	0,480	1,033	1,312	1,547	1,803	1,890	2,392	2,767	2,900	3,558	3,929
94	0,750	1,250	1,580	1,810	2,019	2,145	2,467	2,879	3,105	3,707	3,968

Результаты погрешностей углов и длин линий
со станций лазерного трекера спроектированной сети
с внесенными случайными погрешностями после
уравнивания в программных продуктах SA 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

№ станции	Измеряемая величина	SA	PANDA
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

Приложение 6

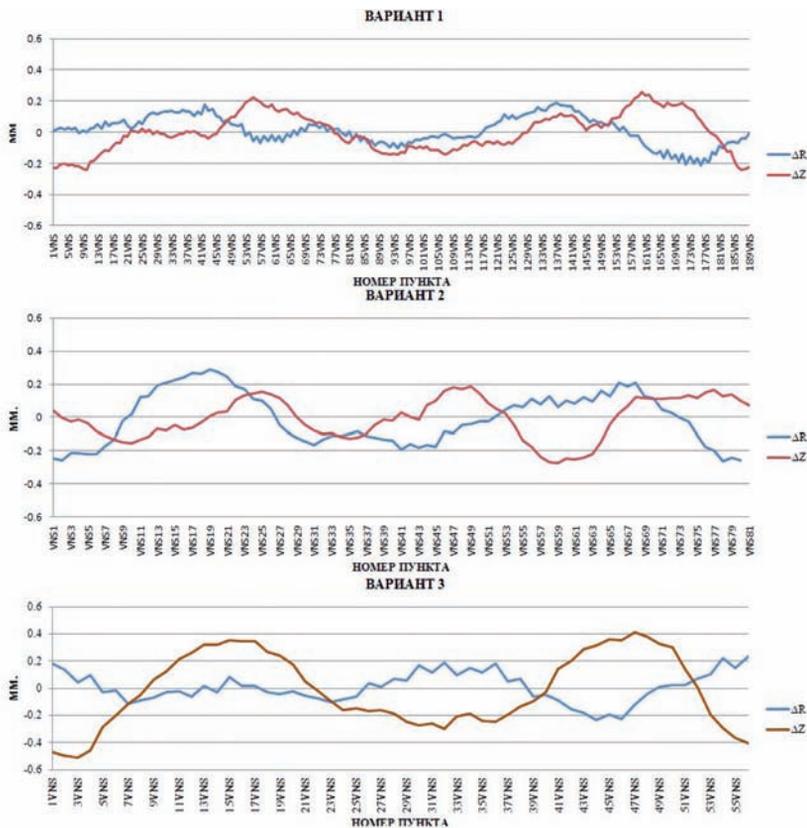
**Разница координат полученных после уравнивания
в SA и PANDA от проектных**

	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

	Spatial Analyzer			PANDA		
	X (MM.)	Y(MM.)	Z(MM.)	X (MM.)	Y(MM.)	Z(MM.)
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



Отклонения урвненных значений координат
геодезических знаков по результатам уравнивания
в *Spatial Analyzer* и *PANDA* сети ВЭПП-4М от проектных



Отклонения уравненных значений координат геодезических знаков, по результатам уравнивания в *Spatial Analyzer* для трех вариантов кольцевой пространственной сети периметром 282,7 метра, от проектных.



*Нивелирование в тоннеле ускорителя.
Пупков Юрий Алексеевич, Сердаков Л.Е.*



*Подготовка к геодезическим измерениям на гирдере.
Буренков Д. Б., Полянский А. В., Сердаков Л. Е.*



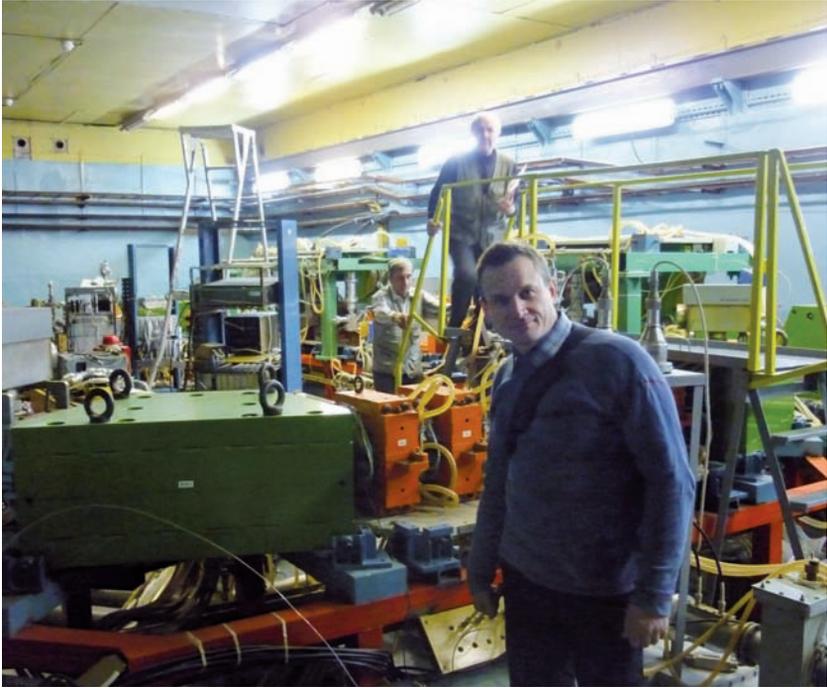
Физическое оборудование в центре европейских ядерных исследований. (Гренобль, Франция)



*Первый в мире ускоритель на встречных пучках.
ВЭПП-1*



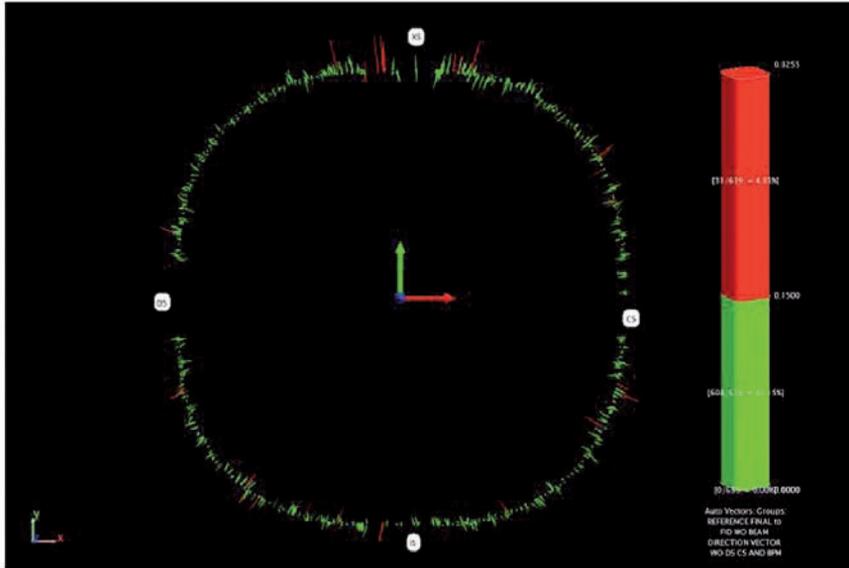
*Боков Марк Аркадьевич
проводит занятия со студентами*



ВЭПП-2000

Результаты контрольного цикла геодезических измерений положения элементов бустера NSLS-II

Part 1: Deviations of Key Elements



All Vectors Summary: Vector Group				
CYU ANALYSIS: Auto Vectors: Groups: REFERENCE FINAL TO FID WO BEAM DIRECTION VECTOR WO DS CS AND BPM				
Statistic	dR	dTheta	dZ	Mag
Min	-0.1726	-0.0000	-0.1493	0.0070
Max	0.3140	0.0000	0.2774	0.3255
Average	0.0051	-0.0000	0.0014	0.0653
StdDev from Avg	0.0588	0.0000	0.0511	0.0445
StdDev from Zero	0.0590	0.0000	0.0511	0.0791
RMS	0.0590	0.0000	0.0510	0.0790
Count	639			

Vector Group										
CYU ANALYSIS: Auto Vectors: Groups: REFERENCE FINAL TO FID WO BEAM DIRECTION VECTOR WO DS CS AND BPM										
Name	Begin			End			Delta			
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag
BR-A1BD1F1	24172.5139	-102.1422	180.0001	24172.4877	-102.1422	180.0052	-0.0262	0.0000	0.0051	0.0269
BR-A1BD1F2	24469.7540	-102.0448	179.9768	24469.7333	-102.0448	179.9795	-0.0213	0.0000	0.0027	0.0240
BR-A1BD1F3	24443.0083	-103.4105	180.0013	24443.0194	-103.4105	179.9774	0.0111	-0.0000	-0.0239	0.0298
BR-A1BD1F4	24653.3163	-104.8930	180.0049	24653.3599	-104.8930	179.9928	0.0346	-0.0000	-0.0421	0.0565
BR-A1BD1F5	24359.3650	-104.8224	179.9910	24359.3739	-104.8224	179.9867	0.0189	-0.0000	-0.0243	0.0329
BR-A1CX1F1	24590.6273	-107.9184	124.0440	24590.6670	-107.9184	124.0710	0.0808	-0.0000	0.0270	0.0884
BR-A1CX1F2	24784.0803	-107.8421	124.0540	24784.0989	-107.8421	124.0420	0.0188	0.0000	-0.0120	0.0222
BR-A1CX1F3	24635.3943	-107.8232	74.2400	24635.4100	-107.8232	74.2382	0.0157	0.0000	-0.0018	0.0187
BR-A1CX1F4	24635.4654	-107.8227	-74.1520	24635.4955	-107.8227	-74.1549	0.0001	0.0000	-0.0028	0.0175
BR-A1CY1F1	24639.6292	-105.8323	150.1020	24639.4872	-105.8323	150.1509	-0.1420	0.0000	0.0489	0.1503
BR-A1CY1F2	24475.6914	-105.8819	150.0620	24475.6304	-105.8819	150.0837	-0.0805	-0.0000	-0.0083	0.0820

Part 1: Deviations of Key Elements

Vector Group												
CYL ANALYSIS - Auto Vectors, Groups, REFERENCE FINAL to FID WO BEAM DIRECTION VECTOR WO DS AND BPM												
Name	Begin			End			Delta					
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag		
BR-XSKIKF1	2308.5547	98.8941	-86.0000	2308.7238	98.8941	-85.7228	0.1691	-0.0000	0.2774	0.3255		
BR-XSKIKF2	24185.5802	98.7927	-86.0000	24185.6362	98.7927	-85.7287	0.0500	0.0000	0.2713	0.2790		
BR-XSKIKF3	24016.3107	95.6082	-86.0000	24016.4674	95.6082	-85.0042	0.1567	0.0000	-0.0042	0.1508		
BR-XSKIKF4	23767.5199	95.6871	-86.0000	23767.5339	95.6871	-85.8301	0.1400	0.0000	0.0669	0.3217		
BR-XSSMP1F1	23769.8099	91.9271	138.3700	23769.7781	91.9271	138.3963	-0.0315	-0.0000	0.0283	0.1513		
BR-XSSMP1F2	23890.7480	91.9182	138.3600	23890.8587	91.9182	138.3705	0.1107	-0.0000	-0.0105	0.1118		
BR-XSSMP1F3	23888.3022	90.7310	138.3700	23888.2723	90.7310	138.3643	-0.0299	0.0000	-0.0057	0.0350		
BR-XSSMP1F4	23778.3112	90.7349	138.3800	23778.2315	90.7349	138.4115	-0.0797	-0.0000	0.0315	0.0875		
BR-XSBUM3F2	23916.0079	85.9480	94.9800	23916.1409	85.9480	95.0238	0.1330	0.0000	0.0638	0.1479		
BR-XSBUM3F3	23762.9892	85.7050	94.9500	23763.0151	85.7050	94.8388	-0.0259	-0.0000	-0.1112	0.1142		
BR-XSBUM3F4	23922.6981	85.7332	94.9600	23922.6157	85.7332	94.9085	-0.0424	-0.0000	-0.0435	0.0937		
BR-A3QF1F1	24119.2377	79.8084	229.8940	24119.4341	79.8084	229.8335	0.1394	0.0000	-0.0302	0.1400		
BR-A3QF1F2	24076.7194	79.8598	229.8480	24076.8387	79.8598	229.8332	0.0953	-0.0000	-0.0145	0.0985		
BR-A3QF1F3	24263.7136	79.8848	229.8800	24263.8294	79.8848	229.1460	-0.0842	0.0000	0.0580	0.1070		
BR-A3QF1F4	24308.9471	79.1513	230.0100	24308.9166	79.1513	230.0650	-0.0305	0.0000	0.0450	0.0547		
BR-XSBUM4F1	24014.2556	80.6854	94.9089	24014.2593	80.6854	94.8544	0.0007	0.0000	-0.0545	0.0582		
BR-XSBUM4F2	24172.1687	80.7272	94.8888	24172.1594	80.7272	94.8027	-0.0093	0.0000	-0.0891	0.0958		
BR-XSBUM4F3	24028.7812	80.4537	95.0052	24028.7140	80.4537	95.0428	-0.0072	-0.0000	0.0376	0.0773		
BR-XSBUM4F4	24186.8757	80.5186	95.0237	24186.7798	80.5186	95.0431	-0.0029	-0.0000	-0.0194	0.0950		
BR-XSCXW2F1	24232.3578	80.5998	132.6300	24232.3225	80.5998	132.6200	0.0098	0.0000	-0.0019	0.0571		
BR-XSCXW2F2	24232.3578	80.1401	132.5500	24232.2986	80.1401	132.5468	-0.0052	0.0000	-0.0032	0.0614		
BR-XSCXW2F3	24283.6971	80.1599	82.4180	24283.5523	80.1599	82.4498	-0.1448	0.0000	0.0318	0.1493		
BR-XSCXW2F4	24283.6995	80.1599	-82.5591	24283.5725	80.1599	-82.5911	-0.0670	-0.0000	-0.0381	0.0778		
BR-A3BD1F1	24172.3587	77.8575	179.9916	24172.4698	77.8575	180.0452	0.1131	0.0000	0.0538	0.1280		
BR-A3BD1F2	24469.6347	77.9548	179.9657	24469.7716	77.9548	180.0246	0.1399	0.0000	0.0289	0.1400		
BR-A3BD1F3	24443.0098	78.5833	179.9776	24443.1039	78.5833	179.9254	0.1511	0.0000	-0.0222	0.1530		
BR-A3BD1F4	24395.8315	78.3095	180.0289	24395.8255	78.3095	180.0405	-0.0010	0.0000	-0.0962	0.1521		
BR-A3BD1F5	24388.1146	78.1775	179.9829	24388.2046	78.1775	179.9310	0.1351	0.0000	-0.0519	0.1446		
BR-A3CX1F1	24784.1576	72.1575	124.0000	24784.0831	72.1575	123.9991	-0.0745	0.0000	-0.0009	0.0747		
BR-A3CX1F2	24590.7414	72.0825	124.0000	24590.6853	72.0825	123.9404	-0.0561	0.0000	-0.0569	0.0641		
BR-A3CX1F3	24835.2887	72.1771	74.2130	24835.2996	72.1771	74.1485	0.1059	-0.0000	-0.0945	0.0654		
BR-A3CX1F4	24836.1574	72.1760	-74.3130	24836.4229	72.1760	-74.3126	0.2605	0.0000	0.0004	0.2656		
BR-A3CY1F1	24639.5580	74.1884	150.0000	24639.5484	74.1884	149.9810	-0.0090	-0.0000	-0.0460	0.0499		
BR-A3CY1F2	24639.5580	74.1206	150.0000	24639.5233	74.1206	150.0287	-0.0045	0.0000	-0.0324	0.0509		
BR-A3CY1F3	24689.0913	74.1835	87.7708	24689.1714	74.1835	87.7069	0.0891	0.0000	-0.0519	0.1033		
BR-A3CY1F4	24689.0913	74.1835	-87.9286	24688.1628	74.1835	-88.0127	0.0715	-0.0000	-0.0841	0.1118		
BR-A3QD1F1	24894.2248	70.7816	229.1291	24894.2327	70.7816	229.1071	0.0079	0.0000	-0.0220	0.0282		
BR-A3QD1F2	24852.0006	71.3067	229.0585	24852.0539	71.3067	229.0454	0.0533	0.0000	-0.0131	0.0585		
BR-A3QD1F3	24839.0132	71.3852	229.9498	24839.0925	71.3852	229.9095	0.0793	0.0000	-0.0401	0.0899		
BR-A3QD1F4	24880.9182	70.8639	229.9722	24880.9285	70.8639	229.9165	0.0893	-0.0000	-0.0557	0.0592		
BR-A3QG1F1	24539.7390	72.8533	229.0811	24539.8240	72.8533	229.0192	0.0950	-0.0000	-0.0619	0.1052		
BR-A3QG1F2	24508.9121	73.3949	229.0498	24508.9131	73.3949	229.0365	0.0010	-0.0000	0.0109	0.1119		
BR-A3QG1F3	24693.9800	79.4578	229.9589	24693.9828	79.4578	229.8981	0.0028	-0.0000	-0.1458	0.1500		
BR-A3QG1F4	24727.6204	72.9303	229.0075	24727.7055	72.9303	229.8988	0.0851	-0.0000	-0.1089	0.1384		
BR-A3BD2F1	25005.1547	65.9433	180.0113	25005.0915	65.9433	179.9857	-0.0632	0.0000	-0.0256	0.0716		
BR-A3BD2F2	25360.2094	66.0401	180.0073	25360.2016	66.0401	179.9408	-0.0075	0.0000	-0.0685	0.0699		
BR-A3BD2F3	25336.9189	64.7186	179.9819	25336.9041	64.7185	179.9119	-0.0148	0.0000	-0.0700	0.0718		
BR-A3BD2F4	25247.9490	63.4859	179.9931	25247.9598	63.4859	179.9590	0.0198	-0.0000	-0.0341	0.0407		
BR-A3BD2F5	25253.0301	63.3597	179.9943	25253.0745	63.3597	179.9975	0.0444	-0.0000	0.0332	0.0475		
BR-A3BF1F1	24785.9587	70.0880	168.0175	24785.8427	70.0880	168.0063	-0.1100	0.0000	-0.0112	0.1183		
BR-A3BF1F2	24943.3877	70.1590	168.0061	24943.2894	70.1590	168.0181	-0.0983	0.0000	0.0130	0.0988		
BR-A3BF1F3	24902.0409	68.8945	168.0352	24901.9323	68.8945	168.0204	-0.1088	0.0000	-0.0148	0.1103		
BR-A3BF1F4	25152.1154	67.7118	168.0258	25152.0212	67.7118	168.0349	-0.0942	0.0000	0.0091	0.0945		
BR-A3BF1F5	24976.1771	67.6240	168.0194	24976.0809	67.6240	168.0409	-0.0902	0.0000	0.0215	0.0995		
BR-A3CX2F1	25328.5862	62.8164	124.0050	25328.5306	62.8164	123.9872	-0.0056	0.0000	-0.0178	0.0520		
BR-A3CX2F2	25223.1781	62.8706	124.0000	25223.1233	62.8706	123.9947	-0.0078	0.0000	-0.0153	0.0550		
BR-A3CX2F3	25254.7928	63.8843	74.1850	25254.7577	63.8843	74.1716	0.0140	-0.0000	-0.1134	0.1159		
BR-A3CX2F4	25574.8186	62.8848	74.1510	25574.7000	62.8848	74.1458	-0.1188	0.0000	0.0054	0.1187		
BR-A3SF1F1	25129.0035	66.8227	159.0300	25128.9693	66.8227	159.0620	-0.0392	0.0000	0.0326	0.0520		
BR-A3SF1F2	24994.2226	66.7613	79.6490	24994.2026	66.7613	79.6215	-0.0157	0.0000	-0.0275	0.0342		
BR-A3SF1F3	25264.0583	66.8885	79.5590	25264.0738	66.8885	79.5727	0.0125	0.0000	0.0137	0.0257		
BR-A3BD3F1	25583.8052	58.0973	180.0269	25583.8880	58.0973	180.0747	0.0828	-0.0000	-0.0478	0.0972		
BR-A3BD3F2	25682.9287	58.1484	180.0117	25683.0176	58.1484	179.9434	0.0869	0.0000	-0.0683	0.1121		
BR-A3BD3F3	25682.9287	58.1484	180.0080	25682.9730	58.1484	180.0076	0.0054	0.0000	-0.0107	0.1169		
BR-A3BD3F4	25975.7253	58.8185	180.0113	25975.7882	58.8185	179.9975	0.0909	-0.0000	-0.0139	0.0930		
BR-A3BD3F5	25877.8227	58.5382	180.0268	25877.8735	58.5382	180.0070	0.0508	0.0000	-0.0198	0.0544		
BR-A3BF2F1	25394.7382	61.9548	166.0390	25394.8957	61.9548	166.0567	-0.0425	-0.0000	0.0177	0.0466		
BR-A3BF2F2	25573.6107	61.9996	166.0200	25573.5822	61.9996	166.0039	-0.0285	0.0000	-0.0161	0.0383		
BR-A3BF2F3	25558.4796	60.7650	166.0390	25558.5281	60.7650	165.9733	0.0495	-0.0000	-0.0857	0.0831		
BR-A3BF2F4	25716.5038	59.5892	166.0280	25716.5468	59.5892	165.9833	0.0430	-0.0000	-0.0847	0.0785		
BR-A3BF2F5	25538.8729	60.5239	166.0390	25538.8135	60.5239	166.0253	0.0466	0.0000	-0.0107	0.0844		
BR-A3CY2F1	25917.4970	66.0163	160.0480	25917.4746	66.0163	160.0402	-0.0221	-0.0000	-0.0079	0.0263		

Part 1: Deviations of Key Elements

Name	Vector Group											
	CYU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups, REFERENCE						FINAL TO FID W/O BEAM DIRECTION VECTOR, W/O DS_CS AND BPM					
	Begin		Z1		End		Delta					
R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag			
BR-A3CY2F2	26762.4520	54.9962	150.0510	26762.4543	54.9962	150.0611	0.0014	-0.0000	0.0101	0.0168		
BR-A3CY2F3	25967.3073	55.0218	97.9920	25967.3103	55.0218	98.0094	0.0030	-0.0000	0.0174	0.0192		
BR-A3CY2F4	25967.2983	55.0220	-87.9830	25967.2983	55.0220	-87.9831	-0.0020	0.0000	-0.0101	0.0170		
BR-A3BD4F1	25639.7583	50.0862	180.0210	25639.7585	50.0862	180.0992	-0.0199	-0.0000	0.0752	0.0939		
BR-A3BD4F2	26139.7690	50.0947	180.0030	26139.7733	50.0947	180.1477	-0.0147	-0.0000	0.1447	0.1485		
BR-A3BD4F3	26040.2504	48.8284	180.0510	26040.2138	48.8284	180.0663	-0.0376	-0.0000	0.0463	0.0507		
BR-A3BD4F4	26179.8232	47.5773	180.0180	26179.7923	47.5773	179.9964	-0.0309	-0.0000	-0.0196	0.0387		
BR-A3BD4F5	25680.3212	47.5396	180.0280	25680.2810	47.5396	180.0171	-0.0602	0.0000	-0.0109	0.0636		
BR-A3BF3F1	25777.5971	54.1380	166.0300	25777.5232	54.1380	166.0176	-0.0739	-0.0000	-0.0124	0.0750		
BR-A3BF3F2	25957.3478	54.1564	166.0400	25957.3237	54.1564	166.0401	-0.0189	-0.0000	0.0001	0.0275		
BR-A3BF3F3	25905.0425	52.9432	166.0810	25905.5878	52.9432	166.0826	-0.0597	-0.0000	0.0016	0.0632		
BR-A3BF3F4	25927.5427	51.7575	166.0510	25927.7692	51.7575	166.1236	-0.0525	-0.0000	0.0726	0.0907		
BR-A3BF3F5	25648.5069	51.7235	166.0400	25648.4916	51.7235	166.0535	-0.0485	0.0000	0.0135	0.0489		
BR-A3SD1F1	26817.7071	50.8874	79.4180	26817.7119	50.8874	79.4088	0.0048	0.0000	-0.0074	0.0174		
BR-A3SD1F5	26092.5276	50.9314	79.3748	26092.5230	50.9314	79.3702	-0.0046	-0.0000	-0.0046	0.0181		
BR-A3BF4F1	25639.4910	46.2070	166.0147	25639.4504	46.2070	165.9888	-0.0300	-0.0000	-0.0161	0.0348		
BR-A3BF4F2	26119.5111	48.1688	166.0093	26119.4614	48.1688	165.9942	-0.0497	-0.0000	-0.0121	0.0494		
BR-A3BF4F3	26032.3242	46.0532	166.0167	26032.2454	46.0532	165.9901	-0.0288	-0.0000	-0.0288	0.0431		
BR-A3BF4F4	25648.5069	43.8000	166.0300	26139.7690	43.8000	166.0665	0.0665	-0.0000	0.0376	0.0776		
BR-A3BF4F5	25639.3213	45.7993	166.0343	25639.3217	45.7993	165.9821	0.0004	-0.0000	-0.0023	0.0433		
BR-A3BD5F1	25879.9399	42.4682	180.0607	25879.8841	42.4682	180.0484	-0.0558	-0.0000	-0.0143	0.0592		
BR-A3BD5F2	26179.6916	42.4316	180.0395	26179.6412	42.4316	180.0788	-0.0504	-0.0000	0.0391	0.0646		
BR-A3BD5F3	26039.8731	41.1822	180.0182	26039.8467	41.1822	180.0129	-0.0264	-0.0000	-0.0053	0.0316		
BR-A3BD5F4	26139.4859	39.9138	179.9516	26139.5124	39.9138	179.8991	0.0205	0.0000	-0.0529	0.0591		
BR-A3BD5F5	25639.3847	39.9222	179.9618	25639.3673	39.9222	179.8780	0.0026	-0.0000	-0.0838	0.0840		
BR-A3BF5F1	25639.3847	38.2531	166.0778	25648.5049	38.2531	165.9430	0.0290	-0.0000	0.0290	0.0490		
BR-A3BF5F2	26027.6390	38.2490	166.0399	26027.6397	38.2490	165.9092	0.0007	-0.0000	-0.1287	0.1308		
BR-A3BF5F3	26005.2640	37.0633	166.0087	26005.2560	37.0633	165.9281	-0.0074	0.0000	-0.0786	0.0794		
BR-A3BF5F4	25657.0638	35.8512	165.9695	25657.0365	35.8512	165.9730	-0.0273	0.0000	0.0035	0.0332		
BR-A3BF5F5	25777.1215	35.8685	166.0017	25777.1089	35.8685	165.9875	-0.0126	-0.0000	-0.0142	0.0263		
BR-A3SD2F1	25954.7703	39.0937	158.9800	25954.7146	39.0937	159.0148	-0.0657	0.0000	0.0348	0.0657		
BR-A3SD2F2	25817.0784	39.1140	179.3050	25817.1975	39.1140	179.2672	0.1211	-0.0000	-0.0378	0.1289		
BR-A3SD2F3	25901.0885	39.0712	179.8870	25901.8142	39.0712	179.8474	-0.0803	-0.0000	-0.0398	0.0901		
BR-A3BD6F1	25975.0192	34.4689	180.0500	25975.1297	34.4689	180.0483	0.0000	-0.0000	-0.0369	0.0369		
BR-A3BD6F2	25975.0192	34.3890	180.0237	25975.0885	34.3890	179.9840	0.0163	0.0000	-0.0227	0.0384		
BR-A3BD6F3	25799.7078	33.1513	180.0245	25799.7057	33.1513	179.9427	-0.0119	0.0000	-0.0818	0.0839		
BR-A3BD6F4	25882.6591	31.8598	179.9412	25882.6286	31.8598	179.8621	-0.0335	0.0000	-0.0791	0.0863		
BR-A3BD6F5	25563.5316	31.9096	180.0007	25563.3956	31.9096	179.8709	-0.1360	0.0000	-0.1301	0.1894		
BR-A3BF6F1	25537.3743	30.4823	166.0279	25537.7403	30.4823	165.9449	-0.0440	-0.0000	-0.0830	0.0940		
BR-A3BF6F2	25715.7893	30.4209	166.0038	25715.7390	30.4209	165.9294	-0.0297	-0.0000	-0.0874	0.0746		
BR-A3BF6F3	25572.7839	28.0086	166.0316	25572.8081	28.0086	166.0789	0.0213	-0.0000	0.0473	0.0531		
BR-A3BF6F4	25938.7920	28.0513	166.0315	25938.7750	28.0513	166.0580	0.0050	0.0000	0.0246	0.0257		
BR-A3CY3F1	25916.8900	34.9902	150.1120	25916.8906	34.9902	150.1441	-0.0020	0.0000	0.0321	0.0369		
BR-A3CY3F2	25751.8700	35.0119	150.0030	25751.8090	35.0119	150.0372	-0.0610	0.0000	0.0342	0.0729		
BR-A3CY3F3	25966.7696	34.9843	97.9570	25966.7881	34.9843	98.0438	0.0088	-0.0000	0.0886	0.0733		
BR-A3CY3F4	25966.7699	34.9842	-87.8920	25966.6484	34.9842	-87.8969	0.1785	0.0000	-0.0049	0.1775		
BR-A3BD7F1	25252.3307	28.8494	180.0380	25252.3273	28.8494	180.0132	-0.0034	-0.0000	-0.0228	0.0232		
BR-A3BD7F2	25547.0616	28.5225	179.9960	25547.0684	28.5225	180.0187	0.0236	0.0000	0.0207	0.0318		
BR-A3BD7F3	25335.0778	25.2919	180.0080	25335.0717	25.2919	180.0627	-0.0608	-0.0000	0.0547	0.0689		
BR-A3BD7F4	25359.4482	23.9883	180.0080	25359.3586	23.9883	180.1711	-0.0876	-0.0000	0.1651	0.1876		
BR-A3BD7F5	25082.4637	24.0651	180.0240	25082.3953	24.0651	180.1424	-0.0884	0.0000	0.1184	0.1493		
BR-A3BF7F1	24075.0867	22.3827	165.9680	24075.0822	22.3827	166.0284	0.0135	0.0000	0.0634	0.0680		
BR-A3BF7F2	25151.0282	22.2949	166.0030	25151.0481	22.2949	166.0361	0.0199	0.0000	0.0331	0.0420		
BR-A3BF7F3	24960.8338	21.1122	166.1510	24960.8802	21.1122	166.2236	0.0484	0.0000	0.0726	0.0872		
BR-A3BF7F4	24942.1474	19.8470	166.0930	24942.1849	19.8470	166.1020	0.0175	-0.0000	0.0090	0.0205		
BR-A3BF7F5	24754.8659	19.9187	166.0540	24754.8958	19.9187	166.0812	0.0046	0.0000	0.0026	0.0061		
BR-A3CX3F1	24356.2272	17.1380	124.0120	24356.0530	17.1380	124.0184	0.0024	-0.0000	0.0014	0.0323		
BR-A3CX3F2	25327.9690	17.1903	124.0170	25327.9552	17.1903	124.1232	-0.0328	-0.0000	0.1082	0.1120		
BR-A3CX3F3	25573.7631	17.1216	73.8810	25573.8508	17.1216	73.8639	0.0737	-0.0000	-0.0171	0.0760		
BR-A3CX3F4	25573.9738	17.1224	-73.8710	25573.8736	17.1224	-73.9268	-0.1000	-0.0000	-0.0858	0.1318		
BR-A3SF2F1	25128.0549	23.1820	159.0467	25128.0780	23.1820	159.0451	0.0231	0.0000	-0.0016	0.0233		
BR-A3SF2F2	24963.2114	23.2463	166.0638	24963.2037	23.2463	170.7327	-0.0077	-0.0000	0.0419	0.0460		
BR-A3SF2F3	24754.8659	23.1166	166.0540	24754.8958	23.1166	166.0812	0.0046	0.0000	0.0026	0.0061		
BR-A3BD8F1	24356.7772	14.8301	180.0639	24356.7374	14.8301	180.0787	-0.0398	-0.0000	0.0148	0.0428		
BR-A3BD8F2	24651.7473	14.7016	180.0772	24651.7604	14.7016	180.0689	0.0131	0.0000	-0.0074	0.0265		
BR-A3BD8F3	24441.5184	13.4245	180.0330	24441.5441	13.4245	179.9778	0.0277	-0.0000	-0.0652	0.0818		
BR-A3BD8F4	24468.3233	12.0528	179.9671	24468.3218	12.0528	179.9546	-0.0015	0.0000	-0.0126	0.0217		
BR-A3BD8F5	24170.6835	12.1468	179.8248	24171.0140	12.1468	179.8057	0.0285	0.0000	-0.0191	0.0349		
BR-A3CY4F1	24638.0188	16.8363	150.1371	24638.0477	16.8363	150.1421	0.0289	-0.0000	0.0050	0.0384		
BR-A3CY4F2	24687.8894	16.8573	150.0099	24687.8502	16.8573	149.9975	0.0109	-0.0000	0.0124	0.0256		
BR-A3CY4F3	24687.8894	16.8217	98.0971	24687.7281	16.8217	98.0547	0.0357	-0.0000	-0.0424	0.0504		

Part 1: Deviations of Key Elements

Vector Group												
CYL ANALYSIS - Auto Vectors, Groups: REFERENCE FINAL to FID W/ BEAM DIRECTION VECTOR WO DS, CS AND BPM												
Name	Begin	Theta1		Z1	Theta2		Z2	dR	dTheta	dZ	Mag	
	R1				R2							
BR-A3CY4F4	24687.7078	18.8227	-97.9959	24687.7490	18.8227	-98.0234	0.0402	0.0000	-0.0279	0.0504		
BR-A3QD2F1	24550.9043	18.0990	230.1957	24550.8520	18.0990	230.1930	-0.0523	0.0000	-0.0021	0.0526		
BR-A3QD2F2	24593.1780	19.2247	230.1407	24593.1922	19.2247	230.1733	0.0142	0.0000	0.0328	0.0356		
BR-A3QD2F3	24579.9242	19.1422	229.9611	24579.8843	19.1422	229.9619	-0.0399	0.0000	0.0008	0.0411		
BR-A3QD2F4	24537.9191	18.8210	229.9769	24537.8741	18.8210	230.0010	-0.0450	0.0000	0.0212	0.0300		
BR-A3QD3F1	24504.7200	19.6109	230.1619	24504.6473	19.6109	230.1277	-0.0583	0.0000	-0.0242	0.0612		
BR-A3QD2F2	24538.4280	17.1424	230.1054	24538.3820	17.1424	230.0725	-0.0690	-0.0000	-0.0339	0.0744		
BR-A3QD2F3	24726.2952	17.0752	229.9610	24726.2254	17.0752	229.9374	-0.0698	-0.0000	-0.0236	0.0738		
BR-A3QD2F4	24592.7845	18.5478	230.0093	24592.7581	18.5478	229.9869	-0.0284	0.0000	-0.0224	0.0352		
BR-A3Q2F1	24074.4053	10.3981	230.0591	24074.4393	10.3981	230.0392	0.0230	-0.0000	-0.0199	0.0426		
BR-A3Q2F2	24116.9845	10.9356	230.0285	24117.0442	10.9356	230.0200	0.0597	-0.0000	-0.0085	0.0604		
BR-A3Q2F3	24303.6047	10.8507	230.1350	24303.5737	10.8507	230.1154	0.0690	-0.0000	-0.0189	0.0719		
BR-A3Q2F4	24281.3930	10.3172	230.1705	24281.4143	10.3172	230.1507	0.0252	0.0000	-0.0168	0.0328		
BR-C5CX1F1	24037.3583	9.9430	132.5350	24037.3343	9.9430	132.4958	-0.0210	-0.0000	-0.0394	0.0458		
BR-C5CX1F2	24230.2809	9.8623	132.5540	24230.2155	9.8623	132.5191	-0.0654	0.0000	-0.0349	0.0787		
BR-C5CX1F3	24281.5321	9.8406	82.3010	24281.5222	9.8406	82.2160	-0.0099	0.0000	-0.0850	0.0858		
BR-C5CX1F4	24281.4814	9.8390	-82.5420	24281.4583	9.8390	-82.5653	-0.0331	0.0000	-0.0233	0.0427		
BR-AAQF1F1	24117.3038	-10.9353	230.1147	24117.3098	-10.9353	230.1002	0.0047	-0.0000	-0.0145	0.0179		
BR-AAQF1F2	24074.8688	-10.3979	230.0909	24074.8511	-10.3979	230.0875	-0.0177	-0.0000	-0.0334	0.0385		
BR-AAQF1F3	24441.5483	-10.3172	230.1705	24441.5470	-10.3172	230.0569	-0.0168	0.0000	-0.0394	0.0458		
BR-AAQF1F4	24303.8954	-10.8503	230.0015	24303.9115	-10.8503	230.0215	0.0181	0.0000	0.0200	0.0307		
BR-C5CX2F1	24037.3183	-9.9428	132.5379	24037.2758	-9.9428	132.5721	-0.0407	-0.0000	0.0342	0.0531		
BR-C5CX2F2	24230.3882	-9.8627	132.5361	24230.3813	-9.8627	132.5477	-0.0099	0.0000	0.0116	0.0209		
BR-C5CX2F3	24281.5804	-9.8413	82.5121	24281.5657	-9.8413	82.5211	0.0153	0.0000	0.0090	0.0205		
BR-C5CX2F4	24281.6207	-9.8416	-82.3809	24281.6497	-9.8416	-82.4373	0.0230	-0.0000	-0.0564	0.0626		
BR-AA8D1F1	24171.0010	-12.1484	180.0960	24170.9992	-12.1484	178.9742	-0.0018	-0.0000	-0.0324	0.0326		
BR-AA8D1F2	24356.8734	-12.0510	180.0469	24356.8702	-12.0510	180.0511	-0.0018	0.0000	-0.0287	0.0361		
BR-AA8D1F3	24441.5483	-12.4258	179.9819	24441.5574	-12.4222	179.9311	0.0000	0.0000	-0.0394	0.0351		
BR-AA8D1F4	24561.9241	-14.8997	179.9950	24561.8907	-14.8997	179.9958	-0.0334	0.0000	0.0008	0.0344		
BR-AA8D1F5	24356.8796	-14.8287	179.9840	24356.8577	-14.8287	179.9771	-0.0219	-0.0000	-0.0069	0.0280		
BR-AA4CY1F1	24638.1439	-15.8381	150.0021	24638.1274	-15.8381	150.0055	-0.0165	-0.0000	0.0034	0.0258		
BR-AA4CY1F2	24474.6233	-15.8877	150.0750	24474.6006	-15.8877	150.0819	-0.0228	0.0000	0.0089	0.0251		
BR-AA4CY1F3	24687.7100	-16.8232	97.8961	24687.7222	-16.8232	97.8889	0.0098	-0.0000	-0.0078	0.0235		
BR-AA4CY1F4	24687.6971	-16.8229	98.0469	24687.7032	-16.8229	98.0593	0.0671	0.0000	-0.0146	0.0590		
BR-AA4QD1F1	24505.9505	-19.2247	230.1174	24505.9660	-19.2247	230.1073	-0.0845	-0.0000	-0.0101	0.0571		
BR-AA4QD1F2	24650.8628	-18.8989	230.0580	24650.8874	-18.8989	230.0625	0.0246	0.0000	-0.0055	0.0290		
BR-AA4QD1F3	24937.8598	-18.8212	229.9454	24937.8908	-18.8212	229.9242	0.0340	-0.0000	-0.0212	0.0400		
BR-AA4QD1F4	24879.7292	-19.1424	229.9852	24879.6852	-19.1424	229.9808	-0.0494	0.0000	-0.0244	0.0504		
BR-AA4QD1F5	24538.9891	-17.1419	230.2888	24538.9507	-17.1419	230.2918	-0.0380	0.0000	0.0030	0.0402		
BR-AA4QD2F1	24505.1572	-18.6105	230.2680	24505.0990	-18.6105	230.2881	-0.0576	0.0000	0.0001	0.0582		
BR-AA4QD2F2	24939.2507	-19.5477	229.7939	24939.2134	-19.5477	229.7947	-0.0463	0.0000	0.0008	0.0463		
BR-AA4QD2F3	24726.8286	-17.0752	229.8947	24726.7783	-17.0752	229.8006	-0.0503	-0.0000	0.0041	0.0542		
BR-AA4D2F1	25082.0774	-24.0630	180.1706	25082.1113	-24.0630	180.2084	0.0339	-0.0000	0.0378	0.0508		
BR-AA4D2F2	25359.1397	-23.9858	180.1260	25359.1497	-23.9858	180.1984	0.0100	0.0000	0.0724	0.0757		
BR-AA4D2F3	25354.8509	-25.2890	180.1893	25354.8807	-25.2890	180.2301	0.0238	0.0000	0.0408	0.0473		
BR-AA4D2F4	25547.0515	-26.5201	180.1707	25547.0834	-26.5201	180.1820	0.0419	-0.0000	0.0219	0.0498		
BR-AA4D2F5	25252.2930	-26.8484	180.1875	25252.3350	-26.8484	180.2044	0.0720	-0.0000	0.0099	0.0736		
BR-AA8F1F1	24764.8781	-19.9193	168.0270	24764.8820	-19.9193	168.0189	-0.0132	0.0000	-0.0081	0.0241		
BR-AA8F1F2	24942.0748	-19.8473	168.0174	24942.0709	-19.8473	168.0259	-0.0037	0.0000	0.0085	0.0158		
BR-AA8F1F3	24980.8390	-21.1119	168.1205	24980.9508	-21.1119	168.9999	0.1148	-0.0000	-0.1209	0.1670		
BR-AA8F1F4	25151.0320	-22.2948	168.0093	25151.1154	-22.2948	168.0347	0.0834	-0.0000	0.0254	0.0874		
BR-AA8F1F5	24975.1157	-22.3826	168.0097	24975.1833	-22.3826	168.0130	0.0878	-0.0000	0.0033	0.0877		
BR-AA4CX1F1	25327.9515	-27.1910	124.0880	25327.9172	-27.1910	124.1228	-0.0343	-0.0000	0.0346	0.0494		
BR-AA4CX1F2	25232.4390	-27.1364	124.0790	25232.4139	-27.1364	124.1098	-0.0251	-0.0000	0.0308	0.0407		
BR-AA4CX1F3	25573.8734	-27.1220	73.9640	25573.8420	-27.1220	73.9814	-0.0314	0.0000	0.0474	0.0582		
BR-AA4CX1F4	25573.9500	-27.1225	74.2000	25573.9858	-27.1225	74.2330	0.0150	-0.0000	0.0270	0.0350		
BR-AA4SF1F1	25127.8902	-23.1527	159.0306	25127.8966	-23.1527	159.0736	-0.0104	0.0000	-0.0472	0.0476		
BR-AA4SF1F2	25293.1237	-23.1210	-79.4358	25293.3244	-23.1210	-79.4043	0.2007	0.0000	0.0019	0.2032		
BR-AA4SF1F3	25263.0222	-23.1199	79.3379	25263.0840	-23.1199	79.3692	0.0624	-0.0000	0.0313	0.0714		
BR-AA4D3F1	25562.8251	-31.9094	180.0595	25562.8528	-31.9094	180.1177	-0.1726	-0.0000	0.0582	0.1822		
BR-AA4D3F2	25581.9178	-31.8582	180.0285	25581.9386	-31.8582	179.9948	0.0149	0.0000	-0.0317	0.0370		
BR-AA4D3F3	25799.2561	-33.1508	180.0847	25799.1912	-33.1508	180.0757	-0.0640	-0.0000	-0.0090	0.0685		
BR-AA4D3F4	25754.9719	-34.3881	180.0498	25754.9078	-34.3881	180.0707	-0.0640	-0.0000	0.0211	0.0874		
BR-AA4D3F5	25127.8784	-34.4988	180.0661	25127.8906	-34.4988	179.9823	-0.0867	-0.0000	-0.0472	0.0476		
BR-AA8F2F1	25293.7818	-28.0517	168.0281	25293.8021	-28.0517	168.0247	0.0203	-0.0000	-0.0014	0.0289		
BR-AA8F2F2	25572.6936	-28.0069	168.0378	25572.6985	-28.0069	168.0448	0.0050	-0.0000	0.0070	0.0200		
BR-AA8F2F3	25657.8234	-29.2414	168.0765	25657.7417	-29.2414	168.0343	-0.0117	0.0000	-0.0422	0.0492		
BR-AA8F2F4	25716.0728	-30.4213	168.0408	25716.0107	-30.4213	168.0085	-0.0621	0.0000	-0.0343	0.0715		
BR-AA8F2F5	25537.7034	-30.4828	168.0707	25537.6381	-30.4828	168.0175	-0.0273	-0.0000	-0.0532	0.0877		
BR-AA4CY2F1	25916.9205	-34.9909	150.1070	25916.9427	-34.9909	150.1059	0.0222	0.0000	-0.0011	0.0294		
BR-AA4CY2F2	25752.0225	-35.0126	150.1020	25752.0712	-35.0126	150.1025	-0.0487	0.0000	-0.0071	0.0519		
BR-AA4CY2F3	25986.8143	-34.9845	97.8820	25986.8459	-34.9845	97.8783	0.0316	0.0000	-0.0040	0.0338		

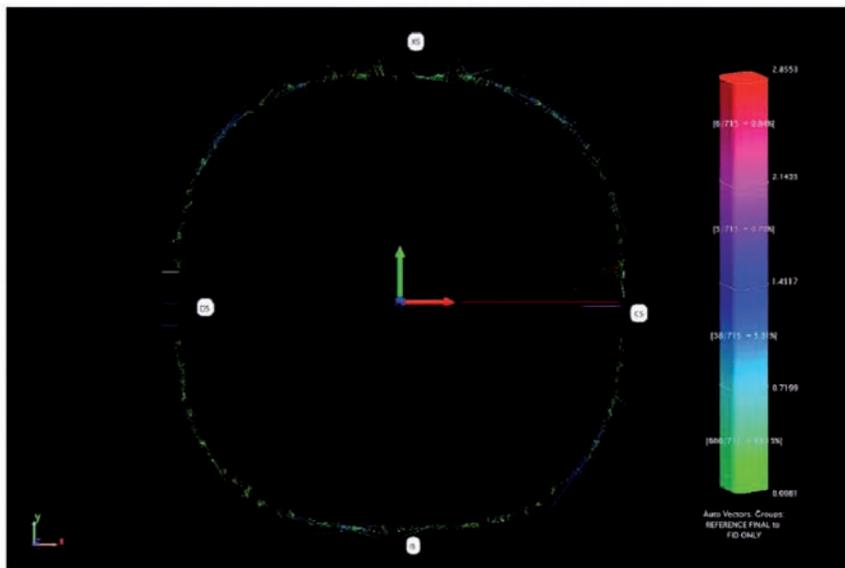
Part 1: Deviations of Key Elements

Name	Vector Group										
	CYL ANALYSIS - Auto Vectors - Groups						REFERENCE FINAL TO FID W/O BEAM DIRECTION VECTOR W/O D.S. AND BPM				
	Begin	Theta1		Z1	End	Theta2		Z2	Delta		
	R1			R2				eR	eTheta	eZ	Mag
BR-A4CY2F4	25966.8238	-34.9847	-97.9500	25966.8372	-34.9847	-97.9907	0.0134	-0.0000	-0.0407	0.0470	
BR-A4BD4F1	25839.4400	-39.9210	180.0220	25839.4392	-39.9210	179.8852	-0.0014	0.0000	-0.1308	0.1375	
BR-A4BD4F2	20139.4511	-39.9122	180.0050	20139.4570	-39.9122	179.8130	0.0059	0.0000	-0.0620	0.0635	
BR-A4BD4F3	20039.9405	-41.1807	180.0250	20039.9339	-41.1807	180.0269	-0.0069	0.0000	0.0016	0.0101	
BR-A4BD4F4	20179.7692	-42.4296	180.0220	20179.8017	-42.4296	180.0276	0.0336	0.0000	0.0056	0.0771	
BR-A4BD4F5	25990.2884	-42.4876	180.0220	25990.3278	-42.4876	180.0168	0.0411	-0.0000	-0.0062	0.0415	
BR-A4BF3F1	25777.0508	-35.8687	166.0280	25777.0588	-35.8687	166.0233	0.0062	-0.0000	-0.0047	0.0096	
BR-A4BF3F2	25656.8777	-35.8512	166.0040	25656.9238	-35.8512	166.0170	0.0461	0.0000	0.0130	0.0496	
BR-A4BF3F3	25905.1778	-37.0835	165.9930	25905.1565	-37.0835	165.9374	-0.0213	0.0000	-0.0569	0.0598	
BR-A4BF3F4	26027.2081	-38.2491	166.0280	26027.1686	-38.2491	165.9744	-0.0375	-0.0000	-0.0536	0.0666	
BR-A4BF3F5	25847.8001	-38.2831	166.0440	25847.7274	-38.2831	165.9970	-0.0277	-0.0000	-0.0470	0.0875	
BR-A4SD1F1	25954.7765	-39.0977	158.8533	25954.8533	-39.0977	158.8344	0.0268	0.0000	-0.0169	0.0373	
BR-A4SD1F2	25817.2830	-39.1191	159.1932	25817.2997	-39.1191	159.2035	0.0257	0.0000	0.0103	0.0278	
BR-A4SD1F5	26002.2231	-39.0763	159.0564	26002.3228	-39.0763	159.4102	0.0695	-0.0000	-0.0699	0.1407	
BR-A4BF4F1	25930.4870	-43.7992	166.0349	25930.4807	-43.7992	166.0540	-0.0063	0.0000	0.0191	0.0203	
BR-A4BF4F2	20119.4032	-43.8070	166.0327	20119.4307	-43.8070	166.0242	0.0275	0.0000	-0.0085	0.0295	
BR-A4BF4F3	20032.2710	-45.0031	166.0683	20032.2898	-45.0031	166.0444	0.0182	0.0000	-0.0239	0.0304	
BR-A4BF4F4	20119.4173	-46.1987	166.0329	20119.4055	-46.1987	166.0575	-0.0118	0.0000	0.0246	0.0278	
BR-A4BF4F5	25930.4568	-46.2070	166.0395	25930.4870	-46.2070	166.0528	0.0104	-0.0000	-0.0099	0.0127	
BR-A4BD5F1	25737.0707	-47.5730	180.0220	25737.0707	-47.5730	180.0220	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
BR-A4BD5F2	20179.6880	-47.5750	179.9871	20179.6828	-47.5750	179.9783	-0.0054	-0.0000	-0.0088	0.0104	
BR-A4BD5F3	20040.2378	-48.8240	180.0768	20040.2588	-48.8240	180.0828	0.0162	0.0000	-0.0028	0.0195	
BR-A4BD5F4	20139.9110	-50.0265	180.0265	20139.8728	-50.0265	179.9907	0.0611	0.0000	-0.0369	0.0709	
BR-A4BD5F5	25839.6530	-50.0840	180.0128	25839.6978	-50.0840	179.9890	0.0439	0.0000	-0.0238	0.0545	
BR-A4BF5F1	25648.4441	-51.7239	166.0760	25648.4269	-51.7239	165.9871	-0.0172	-0.0000	-0.1089	0.1110	
BR-A4BF5F2	26027.9598	-51.7570	166.0210	26027.8713	-51.7570	165.9234	0.0024	0.0000	-0.0956	0.0985	
BR-A4BF5F3	25843.5500	-52.8453	166.0327	25843.5173	-52.8453	165.9127	-0.0274	-0.0000	-0.0526	0.0560	
BR-A4BF5F4	25957.4783	-54.1555	165.9702	25957.5058	-54.1555	165.9515	0.0275	0.0000	-0.0183	0.0237	
BR-A4BF5F5	25777.5668	-54.1381	165.9720	25777.5654	-54.1381	165.9467	-0.0011	-0.0000	-0.0293	0.0300	
BR-A4SD2F1	25954.8680	-50.9127	159.0010	25954.8045	-50.9127	159.0107	-0.0635	-0.0000	0.0097	0.0440	
BR-A4SD2F4	20092.4975	-50.3947	-79.4720	20092.4008	-50.3947	-79.4943	-0.0697	-0.0000	-0.0223	0.0893	
BR-A4SD2F5	20092.3608	-50.9362	79.4190	20092.2824	-50.9362	79.4074	-0.0784	-0.0000	-0.0116	0.0207	
BR-A4BD6F1	25677.6897	-55.5378	180.0439	25677.7356	-55.5378	179.9882	0.0462	0.0000	-0.0596	0.0723	
BR-A4BD6F2	25976.4554	-55.8177	179.9885	25976.5281	-55.8177	179.8359	0.0427	0.0000	-0.0528	0.0580	
BR-A4BD6F3	20092.3154	-56.2556	180.0616	20092.3614	-56.2556	180.0011	0.0490	0.0000	-0.0095	0.0784	
BR-A4BD6F4	25683.3282	-58.1481	180.0368	25683.3628	-58.1481	179.9882	0.0344	-0.0000	-0.0508	0.0539	
BR-A4BD6F5	25654.1532	-58.0973	180.0557	25654.1598	-58.0973	180.0112	0.0094	-0.0000	-0.0446	0.0470	
BR-A4BF6F1	25636.4162	-59.5239	166.0680	25636.4359	-59.5239	166.0027	0.0197	0.0000	-0.0893	0.0892	
BR-A4BF6F2	25716.3583	-59.5851	166.0650	25716.3667	-59.5851	166.0073	0.0084	0.0000	-0.0577	0.0595	
BR-A4BF6F3	25558.5897	-60.7850	166.0430	25558.5887	-60.7850	165.9928	-0.0080	0.0000	-0.0502	0.0524	
BR-A4BF6F4	25974.7687	-61.9994	165.9810	25974.7438	-61.9994	165.9005	-0.0251	0.0000	0.0165	0.0310	
BR-A4BF6F5	25394.9493	-61.9548	165.9740	25394.9232	-61.9548	165.9890	-0.0161	0.0000	0.0030	0.0198	
BR-A4CY3F1	25917.3951	-55.0182	150.0870	25917.4182	-55.0182	150.0459	0.0231	0.0000	-0.0411	0.0493	
BR-A4CY3F2	25752.4342	-54.9948	150.0870	25752.4901	-54.9948	150.0512	0.0559	-0.0000	-0.0368	0.0686	
BR-A4CY3F3	25967.3008	-55.0220	98.0910	25967.3244	-55.0220	98.0388	0.0236	0.0000	-0.0522	0.0585	
BR-A4CY3F4	25967.3237	-55.0221	-97.8500	25967.3960	-55.0221	-97.8419	0.0233	0.0000	0.0081	0.0757	
BR-A4BD7F1	25253.0178	-63.3587	180.0050	25253.0438	-63.3587	179.9514	0.0262	-0.0000	-0.0536	0.0609	
BR-A4BD7F2	25947.9210	-63.4946	180.0030	25947.9551	-63.4946	179.9650	0.0341	0.0000	-0.0380	0.0511	
BR-A4BD7F3	25335.9718	-64.7151	179.9020	25335.9991	-64.7151	179.9415	0.0275	-0.0000	-0.0205	0.0343	
BR-A4BD7F4	25360.4407	-66.0387	179.9970	25360.4420	-66.0387	180.0020	0.0113	0.0000	0.0059	0.0135	
BR-A4BD7F5	25083.3307	-65.9420	179.9920	25083.3168	-65.9420	179.9990	-0.0139	0.0000	0.0070	0.0174	
BR-A4BF7F1	24978.3208	-67.8235	166.0459	24978.2774	-67.8235	165.9852	-0.0432	0.0000	-0.0607	0.0756	
BR-A4BF7F2	25182.2830	-67.7114	166.0682	25182.2831	-67.7114	165.9885	-0.0009	-0.0000	-0.0827	0.0847	
BR-A4BF7F3	24962.1628	-68.9943	166.0702	24962.1586	-68.9943	166.0012	0.0359	-0.0000	-0.0690	0.0691	
BR-A4BF7F4	24943.3934	-70.1587	165.9620	24943.3824	-70.1587	165.9894	-0.0100	-0.0000	-0.0336	0.0397	
BR-A4BF7F5	24785.9204	-70.2879	165.8947	24785.9072	-70.2879	165.8371	-0.0132	0.0000	-0.0276	0.0309	
BR-A4CX2F1	24635.0887	-62.5705	124.0960	24635.0981	-62.5705	124.1344	0.0124	-0.0000	-0.0084	0.0190	
BR-A4CX2F2	24528.5307	-62.8157	124.0280	24528.4911	-62.8157	124.0650	0.0398	-0.0000	-0.0070	0.0279	
BR-A4CX2F3	25074.7929	-62.8930	74.2310	25074.6443	-62.8930	74.3983	-0.1488	-0.0000	0.1373	0.2030	
BR-A4CX2F4	25074.7480	-62.8938	-74.2900	25074.7030	-62.8938	-74.1707	-0.0444	-0.0000	-0.0983	0.1085	
BR-A4SF2F1	25128.9256	-66.8238	159.0210	25129.0020	-66.8238	159.0153	0.0794	0.0000	-0.0057	0.0787	
BR-A4SF2F2	25264.1421	-66.8890	159.5340	25264.1070	-66.8890	159.6182	-0.0351	-0.0000	-0.0842	0.0913	
BR-A4SF2F3	25204.1590	-66.8956	79.4700	25204.1989	-66.8956	79.4329	0.0399	0.0000	-0.0372	0.0507	
BR-A4BF8F1	24635.0887	-62.5705	124.0960	24635.0981	-62.5705	124.0960	0.0000	-0.0000	-0.0084	0.0190	
BR-A4BD8F2	24655.4184	-75.3044	180.0020	24655.4249	-75.3044	180.0067	0.0069	-0.0000	-0.0047	0.0170	
BR-A4BD8F3	24443.2358	-76.5816	180.0070	24443.2368	-76.5816	179.9931	0.0110	-0.0000	-0.0139	0.0188	
BR-A4BD8F4	24470.0782	-77.9531	180.0070	24470.0193	-77.9531	179.9972	-0.0569	-0.0000	-0.0068	0.0915	
BR-A4BD8F5	24172.7318	-77.8561	180.0080	24172.6933	-77.8561	180.0094	-0.0385	-0.0000	0.0034	0.0425	
BR-A4CX3F1	24590.8398	-72.0821	124.0220	24590.8311	-72.0821	124.0943	-0.0085	0.0000	0.0423	0.0443	
BR-A4CX3F2	24794.1488	-72.1570	124.0480	24794.1690	-72.1570	124.0737	0.0225	0.0000	0.0277	0.0597	
BR-A4CX3F3	24635.0887	-72.1789	74.3190	24635.3656	-72.1789	74.3739	0.0226	-0.0000	-0.0084	0.0593	
BR-A4CX3F4	24836.3548	-72.1768	-74.4330	24836.4095	-72.1768	-74.3862	0.0550	0.0000	0.0438	0.0704	

Part 1: Deviations of Key Elements

Vector Group											
CYU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups REFERENCE FINAL to FID, W, O BEAM DIRECTION VECTOR W, O DS, CS AND BPM											
Name	Begin			End			Delta				
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag	
BR-A4CY4F1	24630.4068	-74.1684	180.1400	24630.3968	-74.1684	180.1878	-0.0098	-0.0000	0.0478	0.0498	
BR-A4CY4F2	24475.8328	-74.1182	150.0400	24475.7792	-74.1182	149.9940	-0.0536	-0.0000	-0.0454	0.0710	
BR-A4CY4F3	24689.1549	-74.1832	97.8500	24689.1590	-74.1832	98.0203	0.0047	-0.0000	0.0703	0.0734	
BR-A4CY4F4	24689.1984	-74.1828	-68.1040	24689.2087	-74.1828	-68.0018	0.0703	0.0000	0.1023	0.1258	
BR-A4Q2F1	24652.1165	-71.3080	230.1577	24652.1547	-71.3080	230.1605	0.0382	0.0000	0.0028	0.0439	
BR-A4Q2F2	24604.3215	-70.7811	230.1125	24604.4036	-70.7811	230.0982	0.0823	-0.0000	-0.0173	0.0684	
BR-A4Q2F3	24680.9749	-70.8634	229.9693	24681.0300	-70.8634	229.9782	0.0551	-0.0000	0.0069	0.0582	
BR-A4Q2F4	24630.0872	-71.3846	230.0161	24630.1228	-71.3846	230.0435	0.0365	0.0000	0.0274	0.0471	
BR-A4Q2F5	24505.9033	-73.3951	230.0488	24505.8970	-73.3951	230.0402	-0.0083	-0.0000	-0.0084	0.0178	
BR-A4Q2F6	24539.7336	-72.8635	229.9899	24539.7094	-72.8635	229.9532	-0.0242	0.0000	-0.0367	0.0453	
BR-A4Q2F7	24727.5715	-72.9304	230.0141	24727.5858	-72.9304	229.9750	0.0140	-0.0000	-0.0391	0.0419	
BR-A4Q2F8	24683.8765	-73.4850	230.0589	24683.8700	-73.4850	230.0490	0.0005	-0.0000	-0.0163	0.0187	
BR-A4Q2F9	24308.9206	-79.1698	229.8880	24308.9625	-79.1698	229.8717	-0.0113	-0.0000	-0.0133	0.0173	
BR-ISCXW1F1	24039.2838	-80.0590	132.6320	24039.2196	-80.0590	132.4834	-0.0442	-0.0000	-0.0486	0.0657	
BR-ISCXW1F2	24232.2869	-80.1396	132.6660	24232.2484	-80.1396	132.5228	-0.0385	0.0000	-0.0422	0.0588	
BR-ISCXW1F3	24283.5915	-80.1607	82.4530	24283.5668	-80.1607	82.4163	-0.0247	-0.0000	-0.0367	0.0461	
BR-ISCXW1F4	24283.5662	-80.1610	-82.3710	24283.5882	-80.1610	-82.4045	-0.0080	0.0000	-0.0335	0.0380	
BR-ISKIC1F1	24236.2393	-88.4643	-88.0000	24236.2150	-88.4643	-88.0369	-0.0233	-0.0000	-0.0369	0.0438	
BR-ISKIC1F2	24165.7654	-81.5185	-88.0000	24165.7056	-81.5185	-88.0095	-0.0598	0.0000	-0.0508	0.0621	
BR-ISKIC1F3	23918.8202	-81.4282	-88.0000	23918.8593	-81.4282	-88.0212	-0.0399	-0.0000	-0.0212	0.0456	
BR-ISKIC1F4	23989.7284	-80.3654	-88.0000	23989.6805	-80.3654	-88.0262	-0.0478	-0.0000	-0.0262	0.0556	
BR-ISKIC2F1	23975.6846	-85.4787	-88.0000	23975.6315	-85.4787	-88.0885	-0.0330	0.0000	0.0115	0.0380	
BR-ISKIC2F2	23944.8941	-88.5522	-88.0000	23944.8719	-88.5522	-88.0321	-0.0222	-0.0000	-0.0321	0.0410	
BR-ISKIC2F3	23965.1513	-88.5159	-88.0000	23965.1106	-88.5159	-88.0227	-0.0407	-0.0000	-0.0227	0.0477	
BR-ISKIC2F4	23720.7507	-85.4312	-88.0000	23720.6903	-85.4312	-88.0989	-0.0544	-0.0000	0.0011	0.0580	
BR-ISSMP1F1	23876.5626	-89.7611	124.8320	23876.5623	-89.7611	124.8185	-0.0003	-0.0000	-0.0135	0.0135	
BR-ISSMP1F2	23878.8007	-90.7892	124.8279	23878.8393	-90.7892	124.8301	-0.0074	-0.0000	0.0022	0.0121	
BR-ISSMP1F3	23778.4405	-90.7719	124.9911	23778.4349	-90.7719	124.8787	-0.0083	0.0000	-0.0124	0.0156	
BR-ISSMP1F4	23776.6634	-89.7601	124.8820	23776.6394	-89.7601	124.8577	-0.0240	-0.0000	-0.0243	0.0343	
BR-A1QF1F1	24119.2378	-100.9341	230.0942	24119.2983	-100.9341	230.0323	0.0605	0.0000	-0.0619	0.0687	
BR-A1QF1F2	24076.5697	-100.3969	230.0564	24076.6123	-100.3969	229.9981	0.0426	-0.0000	-0.0583	0.0739	
BR-A1QF1F3	24263.5042	-100.3155	230.0517	24263.5446	-100.3155	230.0293	0.0404	0.0000	-0.0224	0.0469	
BR-A1QF1F4	24305.8222	-100.8489	230.0609	24305.8573	-100.8489	230.0518	0.0351	0.0000	-0.0361	0.0549	
BR-ISCXW2F1	24039.2396	-89.9493	132.5440	24039.3097	-89.9493	132.6154	0.0701	-0.0000	0.0714	0.1007	
BR-ISCXW2F2	24232.4610	-99.5810	132.6530	24232.4610	-99.5810	132.6449	0.0223	0.0000	0.0619	0.0689	
BR-ISCXW2F3	24283.8208	-99.8403	82.2870	24283.8541	-99.8403	82.3585	0.0335	-0.0000	0.0175	0.0804	
BR-ISCXW2F4	24283.8821	-99.8410	-82.4670	24283.7328	-99.8410	-82.4189	0.0505	0.0000	0.0487	0.0706	
BR-ISKIC3F1	23954.2334	-83.4440	-88.9845	23954.1920	-83.4440	-88.9702	-0.0414	0.0000	0.0143	0.0443	
BR-ISKIC3F2	23985.4510	-84.5195	-88.0000	23985.5003	-84.5195	-88.0985	0.1093	-0.0000	0.0115	0.1108	
BR-ISKIC3F3	23736.2028	-84.5671	-88.0000	23736.3506	-84.5671	-88.0708	0.1478	-0.0000	0.0294	0.1516	
BR-ISKIC3F4	23704.6396	-83.4827	-88.0000	23704.6041	-83.4827	-88.0698	-0.0315	0.0000	0.0364	0.0482	
BR-ISKIC4F1	24185.7382	-98.4934	-88.0000	24185.8404	-98.4934	-98.0285	0.1042	-0.0000	-0.0365	0.1095	
BR-ISKIC4F2	24236.2525	-99.5359	-88.1894	24236.2911	-99.5359	-88.1502	0.0388	0.0000	0.0362	0.0533	
BR-ISKIC4F3	23989.7189	-99.6347	-88.0000	23989.7467	-99.6347	-88.0454	0.0278	-0.0000	-0.0454	0.0551	
BR-ISKIC4F4	23918.5543	-98.5717	-88.0000	23918.5195	-98.5717	-88.0021	-0.0348	-0.0000	-0.0021	0.0368	
RFC-F2	23851.0621	6.5508	142.2623	23851.0543	6.5508	142.2579	-0.0078	-0.0000	-0.0044	0.0195	
RFC-F4	24151.9327	1.0899	139.5786	24151.9437	1.0899	139.4925	0.0110	-0.0000	-0.0841	0.0849	
RFC-F5	24150.3834	1.4213	264.8555	24150.3339	1.4213	264.4222	-0.0498	-0.0000	-0.1333	0.1426	
RFC-F6	24191.9050	1.5916	350.3780	24191.8497	1.5916	350.3224	-0.0553	-0.0000	-0.0566	0.0513	
RFC-F7	24299.2985	5.6638	350.4999	24299.2330	5.6638	350.5489	-0.0855	-0.0000	0.0490	0.0823	
RFC-F8	24282.8763	6.1424	262.4187	24282.8049	6.1424	262.4471	-0.0714	0.0000	0.0284	0.0791	
RFC-F1	24301.7702	6.3434	133.1811	24301.7814	6.3434	133.1608	0.0112	-0.0000	-0.0205	0.0269	

Part 2: Deviations of All Elements



All Vectors Summary: Vector Group				
CYU ANALYSIS: Auto Vectors: Groups: REFERENCE FINAL to FID ONLY				
Statistic	dR	dTheta	dZ	Mag
Min	-2.6874	-0.0044	-1.3663	0.0081
Max	2.1919	0.0035	2.4679	2.8553
Average	0.0054	-0.0000	0.0398	0.1909
StdDev from Avg	0.1838	0.0006	0.2379	0.3442
StdDev from Zero	0.1839	0.0006	0.2412	0.3936
RMS	0.1838	0.0006	0.2410	0.3934
Count	715			

Vector Group										
CYU ANALYSIS: Auto Vectors: Groups: REFERENCE FINAL to FID ONLY										
Name	Begin			End			Delta			
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag
BR-A1BD1F1	24172.5139	-102.1422	180.0001	24172.4877	-102.1423	180.0052	-0.0262	-0.0000	0.0051	0.0336
BR-A1BD1F2	24469.7546	-102.0448	179.9768	24469.7333	-102.0448	179.9795	-0.0213	-0.0000	0.0027	0.0232
BR-A1BD1F3	24443.0083	-103.4185	180.0013	24443.0104	-103.4185	179.9774	0.0111	-0.0001	-0.0236	0.0347
BR-A1BD1F4	24653.3183	-104.8936	180.0049	24653.3509	-104.8937	179.9628	0.0346	-0.0002	-0.0421	0.0863
BR-A1BD1F5	24356.3550	-104.8224	179.9910	24356.3739	-104.8225	179.9667	0.0189	-0.0002	-0.0242	0.0768
BR-A1BPM1F1	24525.6589	-105.2615	71.0130	24525.5650	-105.2608	71.0762	-0.0639	0.0017	0.0682	0.7191
BR-A1BPM1F2	24532.6848	-105.3959	71.0130	24532.6795	-105.3942	71.0795	0.0148	0.0018	0.0695	0.7656
BR-A1CX1F1	24590.8273	-107.9184	124.0440	24590.8679	-107.9171	124.0710	0.0606	-0.0007	0.0270	0.2938
BR-A1CX1F2	24784.0803	-107.8421	124.0540	24784.0989	-107.8424	124.0420	0.0180	-0.0003	-0.0121	0.1215
BR-A1CX1F3	24835.3943	-107.8232	74.2400	24835.4100	-107.8235	74.2382	0.0157	-0.0003	-0.0018	0.1343
BR-A1CX1F4	24835.4954	-107.8227	-74.1520	24835.4955	-107.8232	-74.1546	0.0001	-0.0005	-0.0026	0.2165

Part 2: Deviations of All Elements

Vector Group										
CVU ANALYSIS: Auto Vectors; Groups: REFERENCE.FINAL to FID ONLY										
Name	Begin			End			Delta			
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag
BR-A1CY1F1	24639.6262	-105.8323	180.1020	24639.4672	-105.8323	180.1509	-0.1420	0.0000	0.0489	0.1511
BR-A1CY1F2	24475.0914	-105.8819	190.0920	24475.6309	-105.8818	190.0837	-0.0904	0.0000	-0.0083	0.0044
BR-A1CY1F3	24689.1891	-105.8187	97.8750	24689.1112	-105.8186	97.8543	-0.0578	0.0001	-0.0208	0.0829
BR-A1CY1F4	24689.1859	-105.8173	-98.0680	24689.1637	-105.8174	-98.0748	-0.0229	-0.0000	-0.0028	0.0304
BR-A1QD1F1	24683.9380	-109.2179	230.0459	24683.8196	-109.2180	230.0352	-0.0528	-0.0001	-0.0117	0.0969
BR-A1QD1F2	24681.8040	-108.8028	230.0129	24681.7831	-108.8029	230.0444	-0.0410	-0.0001	0.0315	0.0920
BR-A1QD1F3	24638.8203	-108.6145	230.1478	24638.7880	-108.6145	230.1608	-0.0254	-0.0000	0.0129	0.0950
BR-A1QD1F4	24680.7860	-109.1357	230.1353	24680.7799	-109.1358	230.1469	-0.0061	-0.0001	0.0116	0.0850
BR-A1QG1F1	24539.7704	-107.1353	230.1092	24539.7600	-107.1354	230.1075	-0.1004	-0.0001	-0.0017	0.0363
BR-A1QG1F2	24505.9188	-106.8039	230.0518	24505.9058	-106.8039	230.0486	-0.1030	-0.0001	-0.0032	0.0478
BR-A1QI3F1	24604.0380	-106.5409	229.9606	24604.0374	-106.5409	229.9546	0.0007	-0.0000	-0.0060	0.0144
BR-A1QI3F2	24727.6630	-107.0094	229.8950	24727.6530	-107.0094	229.8999	-0.0028	-0.0001	-0.0051	0.0321
BR-A1B02F1	25063.3712	-114.2655	190.0450	25063.2510	-114.2654	190.1357	-0.1202	0.0001	0.0207	0.1659
BR-A1B02F2	26380.3975	-113.9568	179.9680	26380.3744	-113.9567	180.0597	-0.0232	0.0001	0.0817	0.0798
BR-A1B02F3	25335.9962	-115.2834	180.1240	25335.9501	-115.2834	180.1427	-0.0371	-0.0000	0.0187	0.0422
BR-A1B02F4	25548.0188	-116.5140	180.0210	25548.0080	-116.5142	180.0193	-0.1008	-0.0002	-0.0017	0.1067
BR-A1B02F5	26253.2352	-116.0399	180.0480	26253.1972	-116.0401	180.0431	-0.0380	-0.0003	-0.0048	0.1210
BR-A1BF1F1	24755.7830	-109.6121	181.8963	24755.7469	-109.6117	180.0223	-0.3380	0.0004	0.0280	0.1595
BR-A1BF1F2	24943.2952	-109.8409	186.0312	24943.2281	-109.8408	186.0275	-0.3381	0.0004	-0.0037	0.1037
BR-A1BF1F3	25542.7493	-111.1036	185.9999	25542.7196	-111.1036	186.0345	-0.0686	-0.0003	0.0277	0.1247
BR-A1BF1F4	25152.0524	-112.2882	166.0485	25152.0430	-112.2881	166.1151	-0.0178	0.0001	0.0686	0.0795
BR-A1BF1F5	24976.1074	-112.3780	166.0205	24976.0748	-112.3759	166.1204	-0.0328	0.0001	0.0999	0.1118
BR-A1BM2F1	25154.5627	-113.4571	71.0130	25154.6313	-113.4580	72.1371	0.0686	-0.0009	0.1241	1.1874
BR-A1BM2F2	25166.4859	-113.5864	71.0130	25166.5048	-113.5874	72.0696	0.0189	-0.0010	1.0588	1.5109
BR-A1CX2F1	25328.8807	-117.1855	124.0560	25328.8370	-117.1854	124.0718	-0.0497	0.0001	0.0158	0.0599
BR-A1CX2F2	25523.4311	-117.1304	124.0570	25523.3753	-117.1305	124.0220	-0.0558	-0.0001	-0.0350	0.0724
BR-A1CX2F3	25500.1325	-117.1118	190.0425	25500.1719	-117.1117	174.1767	0.0304	-0.0001	0.0247	0.0985
BR-A1CX2F4	25574.7493	-117.1158	-74.2440	25574.6928	-117.1151	-74.2526	-0.0870	0.0000	-0.0388	0.0958
BR-A1SF1F1	25129.3458	-113.1788	158.0580	25129.3700	-113.1785	159.0099	0.0272	0.0003	0.0549	0.1337
BR-A1SF1F2	24994.3905	-113.2435	79.1630	24994.3600	-113.2432	79.1790	-0.0299	0.0003	0.0160	0.1172
BR-A1SF1F5	25294.3591	-113.1180	79.8760	25294.3743	-113.1180	79.7171	0.0152	0.0000	0.0411	0.0472
BR-A1B03F1	25563.7493	-121.9036	180.0201	25563.6726	-121.9038	180.1140	-0.0764	-0.0000	0.0939	0.1212
BR-A1B03F2	25863.0953	-121.8526	179.9629	25862.9743	-121.8528	180.0021	-0.0309	0.0000	0.0562	0.0950
BR-A1B03F3	25800.1328	-123.1449	180.0460	25800.1212	-123.1451	180.0707	-0.0116	-0.0001	0.0247	0.0865
BR-A1B03F4	25845.2783	-124.3829	180.0518	25845.2630	-124.3829	180.0680	0.0505	-0.0003	-0.0156	0.1305
BR-A1B03F5	25677.8544	-124.4627	180.0681	25677.8932	-124.4630	180.0518	0.0388	-0.0003	-0.0143	0.1442
BR-A1BF2F1	25394.5598	-118.0440	166.0340	25394.4880	-118.0446	166.0530	-0.0718	0.0003	0.0190	0.1645
BR-A1BF2F2	25573.4626	-118.0002	166.0230	25573.4484	-117.9999	166.0161	-0.0142	0.0003	-0.0095	0.1419
BR-A1BF2F3	25558.4534	-119.2346	166.0300	25558.4450	-119.2344	166.0417	-0.0084	0.0002	0.0117	0.0829
BR-A1BF2F4	25718.0580	-120.4145	166.0250	25718.0729	-120.4145	166.0502	0.0149	0.0001	0.0252	0.0472
BR-A1BF2F5	25538.1177	-120.4758	166.0490	25538.0942	-120.4758	166.0665	-0.0235	0.0000	0.0265	0.0370
BR-A1BM3F1	25658.4034	-121.1002	71.0130	25658.5159	-121.0997	71.8621	0.1104	0.0005	0.8491	0.8593
BR-A1BM3F2	25686.3232	-121.2285	71.0130	25686.2569	-121.2282	71.8598	-0.0844	0.0002	0.8486	0.8585
BR-A1CY2F1	25917.4638	-124.9845	190.0930	25917.4543	-124.9844	190.0717	-0.0045	0.0001	-0.0213	0.0330
BR-A1CY2F2	25752.5263	-125.0051	150.1500	25752.5222	-125.0050	150.1016	-0.0041	0.0001	-0.0484	0.0553
BR-A1CY2F3	25967.3244	-124.9785	97.8020	25967.3675	-124.9785	97.8891	0.0431	-0.0000	-0.0129	0.0400
BR-A1CY2F4	25967.3621	-124.9784	-98.1120	25967.3670	-124.9785	-98.1065	0.0248	-0.0000	0.0055	0.0318
BR-A1B04F1	25939.6446	-129.9159	180.0811	25939.5115	-129.9157	179.9699	-0.1331	0.0002	-0.0713	0.1711
BR-A1B04F2	26139.5922	-129.9072	179.8992	26139.4936	-129.9072	179.9252	-0.0986	0.0001	-0.0029	0.1196
BR-A1B04F3	26040.0923	-131.1758	180.0255	26040.0011	-131.1757	179.9908	-0.0912	-0.0001	-0.0347	0.1114
BR-A1B04F4	26179.7222	-132.4246	179.9943	26179.6557	-132.4249	179.9803	-0.0665	-0.0003	-0.0340	0.1438
BR-A1B04F5	25880.2282	-132.4624	180.0114	25880.1569	-132.4626	179.9997	-0.0713	-0.0003	-0.0117	0.1380
BR-A1BF3F1	25777.4818	-125.8623	166.0891	25777.5861	-125.8621	166.0234	0.1042	0.0002	-0.0857	0.1871
BR-A1BF3F2	25957.3303	-125.8445	166.0534	25957.4077	-125.8445	165.9913	0.1374	0.0002	-0.0721	0.1893
BR-A1BF3F3	25905.4938	-127.0568	166.0592	25905.5602	-127.0568	166.0690	0.0664	-0.0000	-0.0902	0.1133
BR-A1BF3F4	26027.5372	-128.2428	166.0203	26027.5591	-128.2427	165.9485	0.2119	-0.0000	-0.0717	0.2762
BR-A1BF3F5	25945.2783	-128.2788	166.0344	25945.2850	-128.2788	165.9718	-0.0267	-0.0000	-0.0688	0.0342
BR-A1BM4F1	26084.3403	-129.3645	71.0130	26084.3385	-129.3647	71.2684	-0.0038	-0.0001	0.2554	0.2638
BR-A1BM4F2	25968.8434	-129.4921	71.0130	25968.8558	-129.4921	71.2552	0.0424	-0.0000	0.2422	0.2459
BR-A1SD1F1	25955.0904	-129.0891	159.0858	25955.1778	-129.0892	159.1227	0.0814	-0.0001	0.0369	0.0393
BR-A1SD1F2	25955.0904	-129.0891	159.0858	25955.1360	-129.0892	159.1703	0.0396	-0.0001	0.0845	0.0974
BR-A1SD1F3	25817.6122	-129.1123	79.4166	25817.5306	-129.1125	79.4120	-0.0816	-0.0002	-0.0400	0.1088
BR-A1SD1F4	26092.3759	-129.0972	-79.8312	26092.4914	-129.0970	-76.8807	0.1125	0.0002	0.1505	0.2070
BR-A1SD1F5	26000.1745	-129.0676	79.1451	26000.2050	-129.0676	79.2234	0.0476	-0.0000	0.0365	0.0658
BR-A1SD1F6	26002.7745	-129.0575	79.1451	26002.8881	-129.0577	79.1947	0.1116	-0.0001	0.0496	0.1500
BR-A1BF4F1	26030.5377	-133.7626	166.0280	26030.5434	-133.7626	166.0131	0.0057	0.0001	0.0085	0.0843
BR-A1BF4F2	26119.5538	-133.8010	166.0170	26119.5374	-133.8004	166.0103	-0.0163	0.0001	-0.0087	0.0286
BR-A1BF4F3	26032.2343	-134.9995	165.9510	26032.1833	-134.9995	165.9480	-0.0510	0.0000	-0.0030	0.0520
BR-A1BF4F4	26119.3599	-136.1921	166.0440	26119.3144	-136.1922	165.9999	-0.0425	-0.0001	-0.0441	0.0897
BR-A1BF4F5	25939.3951	-136.2004	166.0550	25939.3418	-136.2005	166.0189	-0.0333	-0.0001	-0.0372	0.0888
BR-A1BF4F6	25876.8938	-137.5312	180.0193	25876.9253	-137.5310	179.9784	0.0316	-0.0000	-0.0316	0.0856
BR-A1B05F2	26179.4967	-137.5687	179.9930	26179.5503	-137.5686	179.9669	0.0537	0.0001	-0.0261	0.0521

Part 2: Deviations of All Elements

Name	Vector Group										
	CYU ANALYSIS - Auto Vectors, Groups: REFERENCE FINAL to FID ONLY										
	Begin		Z1		End		Z2		dR	dTheta	dZ
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2					
BR-A1BD05F3	26036.7836	-138.8179	180.0000	26036.8100	-138.8178	180.0262	0.0265	-0.0000	0.0202	0.0388	
BR-A1BD05F4	26130.4820	-140.0863	180.0070	26130.4975	-140.0864	180.0369	0.0149	-0.0001	0.0299	0.0528	
BR-A1BD05F5	25836.4005	-140.0779	180.0000	25836.3834	-140.0779	180.0325	-0.0171	-0.0001	0.0325	0.0450	
BR-A1BF5F1	25945.6936	-141.7171	165.9550	25945.6873	-141.7172	165.9788	0.0034	-0.0001	0.0137	0.0340	
BR-A1BF5F2	26027.5213	-141.7515	165.9680	26027.5350	-141.7515	165.9943	0.0137	-0.0001	0.0093	0.0474	
BR-A1BF5F3	25905.2048	-142.6367	166.0900	25905.1822	-142.6369	166.0883	-0.0225	-0.0002	-0.0007	0.0904	
BR-A1BF5F4	25957.0171	-144.1490	166.0920	25956.9928	-144.1493	166.0728	-0.0243	-0.0004	-0.0192	0.1641	
BR-A1BF5F5	25777.0807	-144.1310	166.0840	25777.0663	-144.1319	166.0615	-0.0204	-0.0003	-0.0025	0.1442	
BR-A1BPM5F1	25968.5678	-140.5014	71.0130	25968.4907	-140.5014	70.8164	-0.0011	-0.0000	-0.0678	0.1153	
BR-A1BPM5F2	25964.0481	-140.6200	71.0130	25964.0366	-140.6269	70.8778	0.0385	0.0000	-0.1352	0.1423	
BR-A1SD2F1	25954.6734	-140.9390	158.9050	25954.6901	-140.9393	158.9542	0.1167	-0.0003	0.0492	0.1291	
BR-A1SD2F4	26091.9856	-140.9313	-79.7260	26092.0485	-140.9393	-79.7337	0.0629	0.0010	-0.0077	0.4378	
BR-A1SD2F6	26092.1256	-140.9309	79.2170	26092.1575	-140.9307	79.2627	0.0319	0.0002	0.0457	0.1170	
BR-A1BD09F1	25677.1430	-145.5312	180.0160	25677.1653	-145.5310	180.0059	0.0234	0.0002	-0.0101	0.0891	
BR-A1BD09F2	25974.9890	-145.5112	180.0238	25975.0268	-145.5110	180.0033	0.0379	-0.0002	-0.0205	0.1048	
BR-A1BD09F3	25799.7175	-146.8489	179.8885	25799.7454	-146.8490	180.0239	0.0298	-0.0000	0.0354	0.0478	
BR-A1BD09F4	25862.5685	-148.1414	180.0296	25862.6050	-148.1416	180.0059	0.0366	-0.0002	0.0203	0.1024	
BR-A1BD09F5	25563.4941	-148.0905	180.0250	25563.5106	-148.0905	180.0340	0.0299	-0.0001	0.0090	0.0586	
BR-A1BF0F1	25593.7504	-150.0000	166.0000	25593.7504	-150.0000	166.0493	0.0526	0.0000	-0.0034	0.0581	
BR-A1BF0F2	25715.6803	-149.5791	166.0180	25715.7834	-149.5791	166.0454	0.0381	-0.0000	0.0274	0.0881	
BR-A1BF0F3	26557.6224	-150.7588	166.1380	26557.6689	-150.7591	166.1511	0.0465	-0.0003	0.0131	0.1361	
BR-A1BF0F4	25572.7059	-151.9635	166.0250	25572.7268	-151.9639	166.0315	-0.0210	-0.0000	-0.0115	0.1508	
BR-A1BF0F5	25363.7823	-151.9486	166.0740	25363.7252	-151.9489	166.0515	-0.0317	-0.0003	-0.0225	0.1503	
BR-A1BPM6F1	25685.6148	-148.7851	71.0130	25685.6844	-148.7871	71.7334	0.0496	-0.0020	0.7204	1.1397	
BR-A1BPM6F2	25657.6885	-148.8934	71.0130	25657.8206	-148.8953	71.7200	0.1321	-0.0019	0.7070	1.1194	
BR-A1CY3F1	25752.4681	-149.8885	149.8880	25752.4681	-149.8885	149.9099	0.0493	0.0000	0.0000	0.0581	
BR-A1CY3F2	25752.4681	-149.8885	149.8880	25752.4130	-149.8885	149.9078	0.0236	0.0001	0.0128	0.0711	
BR-A1CY3F3	25958.7544	-145.0160	97.8990	25958.7933	-145.0161	98.0083	0.0388	-0.0001	0.0173	0.0520	
BR-A1CY3F4	25958.8095	-145.0152	-97.9380	25958.8266	-145.0158	-97.9287	0.0191	-0.0006	0.0093	0.2755	
BR-A1BD07F1	25252.0903	-153.3528	179.9810	25252.0944	-153.3523	180.0682	-0.0260	-0.0003	0.0872	0.1610	
BR-A1BD07F2	25546.8396	-153.4785	180.0080	25546.8330	-153.4783	180.0340	-0.0055	0.0002	0.0200	0.1094	
BR-A1BD07F3	25335.0911	-154.7091	179.9750	25335.0962	-154.7089	180.0373	0.0051	0.0002	0.0623	0.0582	
BR-A1BD07F4	25335.3022	-156.0327	179.9950	25335.3201	-156.0326	180.0140	0.2339	0.0001	0.0190	0.0581	
BR-A1BD07F5	25958.0000	-156.8369	180.0000	25958.0000	-156.8369	180.0132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0720	
BR-A1BF7F1	24974.9483	-167.6178	165.9700	24975.0035	-167.6177	166.1457	0.0552	0.0001	0.1647	0.1790	
BR-A1BF7F2	25150.9211	-157.7056	165.9600	25150.9524	-157.7055	166.0729	0.0313	0.0001	0.1069	0.1232	
BR-A1BF7F3	24950.7173	-158.8882	166.0110	24950.7574	-158.8883	166.0718	0.0402	-0.0001	0.0608	0.0828	
BR-A1BF7F4	24942.0536	-160.1529	166.0900	24942.0721	-160.1531	166.0571	0.0185	-0.0002	-0.0229	0.0829	
BR-A1BF7F5	24764.5958	-160.0819	166.0780	24764.6082	-160.0821	166.0785	0.0124	-0.0002	0.0005	0.0877	
BR-A1BPM7F1	25165.3992	-156.4073	71.0130	25165.3999	-156.4079	71.2421	0.0007	-0.0006	0.2291	0.3450	
BR-A1BPM7F2	25165.4697	-156.5366	71.0130	25165.4652	-156.5371	71.2287	0.0154	-0.0006	0.2157	0.3317	
BR-A1CX3F1	25327.9014	-152.8076	124.0360	25327.8262	-152.8096	124.1201	-0.0752	-0.0001	0.0841	0.1274	
BR-A1CX3F2	25522.4825	-152.8833	123.9960	25522.4903	-152.8834	124.0165	0.0078	-0.0001	0.0185	0.0359	
BR-A1CX3F3	25573.9810	-152.8771	73.9130	25573.9507	-152.8799	73.9819	-0.0309	0.0002	0.0689	0.1299	
BR-A1CX3F4	25573.9555	-152.8782	-74.0350	25573.9083	-152.8779	-74.0312	-0.0472	0.0002	0.0038	0.1114	
BR-A1SP2F1	25127.5143	-156.8126	158.9130	25127.6482	-156.8215	159.1134	0.1339	0.0001	0.2004	0.2459	
BR-A1SP2F2	25262.8158	-156.8846	-79.5370	25262.7796	-156.8846	-79.2447	-0.0393	0.0000	0.0923	0.1036	
BR-A1BD8F1	24356.8621	-165.8697	180.0740	24356.8851	-165.8695	180.1397	-0.0070	0.0002	0.0657	0.1019	
BR-A1BD8F2	24651.9735	-165.2982	180.0687	24651.9564	-165.2981	180.1411	-0.0162	0.0002	0.0724	0.1028	
BR-A1BD8F3	24441.8553	-166.5754	180.0287	24441.8399	-166.5754	180.0183	-0.0154	-0.0000	-0.0104	0.0204	
BR-A1BD8F4	24468.4954	-167.9472	179.9489	24468.5162	-167.9473	179.9074	0.0208	-0.0000	-0.0395	0.0453	
BR-A1BD8F5	24171.2654	-167.8500	179.9871	24171.2241	-167.8501	179.9027	-0.0413	-0.0001	-0.0644	0.0874	
BR-A1CY4F1	24638.1242	-164.1632	150.0700	24638.0968	-164.1629	150.1158	-0.0334	0.0003	0.0458	0.0666	
BR-A1CY4F2	24474.7134	-164.1123	150.0680	24474.8206	-164.1124	150.0834	-0.0926	-0.0001	-0.0946	0.0646	
BR-A1CY4F4	24657.7246	-164.1749	-98.9300	24657.8600	-164.1749	-97.9722	-0.0372	-0.0009	0.0578	0.4094	
BR-A1QD2F1	24650.8377	-161.3000	230.0940	24650.7727	-161.3001	230.0834	-0.0860	-0.0001	-0.0108	0.0791	
BR-A1QD2F2	24962.8712	-160.7751	230.0587	24962.8448	-160.7748	230.0316	-0.0294	0.0002	-0.0271	0.1013	
BR-A1QD2F3	24879.5919	-160.8571	230.0317	24879.5813	-160.8568	230.0279	-0.0107	0.0002	-0.0038	0.1082	
BR-A1QD2F4	24837.9085	-161.3783	230.0287	24837.8360	-161.3782	230.0685	-0.0705	0.0000	0.0368	0.0818	
BR-A1QZ2F1	24904.7911	-163.3862	230.1888	24904.7480	-163.3891	230.1976	-0.0451	0.0001	0.0388	0.0983	
BR-A1QZ2F2	24538.6816	-162.8576	230.0987	24538.6822	-162.8575	230.1280	0.0006	0.0001	0.0413	0.0919	
BR-A1QZ2F3	24726.5246	-162.9246	-98.9300	24726.5246	-162.9246	-98.9300	0.0000	0.0000	0.0197	0.0197	
BR-A1QZ2F4	24692.8733	-163.4521	229.9705	24692.8519	-163.4521	230.0048	-0.0214	0.0001	0.0343	0.0489	
BR-A1QF2F1	24074.5919	-169.6022	230.1314	24074.5885	-169.6023	230.1342	-0.0254	-0.0001	0.0028	0.0485	
BR-A1QF2F2	24117.1595	-169.0648	230.0959	24117.1551	-169.0649	230.1112	-0.0044	-0.0001	0.0153	0.0334	
BR-A1QF2F3	24303.8190	-169.1499	230.0316	24303.8228	-169.1499	230.0535	-0.0037	-0.0001	0.0219	0.0347	
BR-A1QF2F4	24201.6187	-169.8832	230.0960	24201.5450	-169.8833	230.0715	-0.0737	-0.0001	0.0025	0.0950	
BR-D5CX1F1	24037.2055	-170.0575	132.5990	24037.2245	-170.0574	132.6172	0.1016	0.0001	0.0162	0.0470	
BR-D5CX1F2	24239.5246	-170.1378	132.6000	24239.5246	-170.1378	132.6000	0.0000	0.0000	0.0197	0.0197	
BR-D5CX1F3	24261.8684	-170.1568	82.8259	24261.8684	-170.1568	82.8468	-0.0200	0.0000	0.0209	0.0201	
BR-D5CX1F4	24281.6706	-170.1596	-82.8931	24281.7228	-170.1596	-82.8902	0.0522	0.0001	0.0028	0.0815	

Part 2: Deviations of All Elements

Name	Vector Group						Delta			
	CVU ANALYSIS-Auto Vectors- Groups: REFERENCE-FINAL to FID ONLY						dR	dTheta	dZ	Mag
	Begin	Z1		End	Z2					
R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2					
BR-A2QF1F1	24116.9628	169.0549	230.0790	24116.9244	169.0651	230.1899	-0.0384	0.0002	0.1109	0.1340
BR-A2QF1F2	24074.5000	169.0024	230.0333	24074.5542	169.0027	230.1078	0.0482	0.0003	0.0745	0.1428
BR-A2QF1F3	24281.4458	169.5833	230.0841	24281.4922	169.5834	230.1274	0.0484	0.0001	0.0833	0.0856
BR-A2QF1F4	24303.5412	169.1498	230.0922	24303.6098	169.1499	230.2009	0.0686	0.0001	0.1087	0.1338
BR-D5CX2F1	24037.3053	170.0578	132.5680	24037.6075	170.0580	132.6101	0.0015	0.0002	0.0421	0.1052
BR-D5CX2F2	24230.6167	170.1372	132.5550	24230.6969	170.1375	132.6128	-0.0228	0.0002	0.0578	0.1103
BR-D5CX2F3	24281.6879	170.1584	82.3600	24281.8235	170.1587	82.4550	-0.0844	0.0003	0.0860	0.1029
BR-D5CX2F4	24281.6430	170.1583	-82.3600	24281.5560	170.1586	-82.3220	-0.0842	0.0001	0.0730	0.1259
BR-A2BD1F1	24170.9511	167.8521	180.0341	24170.9912	167.8521	180.0853	0.0400	0.0001	0.0512	0.0891
BR-A2BD1F2	24448.1410	167.9492	179.9989	24448.1281	167.9492	180.0151	-0.0129	-0.0000	0.0161	0.0207
BR-A2BD1F3	24441.4387	166.5773	179.8520	24441.4411	166.5772	179.9988	0.0024	-0.0001	0.0168	0.0519
BR-A2BD1F4	24651.6818	165.3004	180.0223	24651.6770	165.3003	179.9902	-0.0042	-0.0002	-0.0227	0.0302
BR-A2CY1F1	24356.7471	165.1718	180.0421	24356.7689	165.1718	180.0527	0.0212	-0.0002	0.0198	0.0907
BR-A2CY1F2	24638.2458	164.1616	160.1089	24638.3021	164.1616	160.1280	0.0583	-0.0002	0.0180	0.1088
BR-A2CY1F3	24474.1744	164.1124	150.0720	24474.2566	164.1121	150.0636	0.0822	-0.0003	-0.0084	0.1546
BR-A2CY1F4	24687.7507	164.1773	98.0479	24687.8058	164.1772	98.0748	0.0551	-0.0001	0.0269	0.0795
BR-A2CY1F5	24687.8392	164.1770	-97.8521	24687.8070	164.1773	-97.8218	0.1678	0.0003	0.0303	0.2041
BR-A2QD1F1	24692.8919	160.7756	230.0653	24692.8828	160.7757	230.0120	0.0007	0.0001	-0.0533	0.0712
BR-A2QD1F2	24650.7238	161.3007	230.0566	24650.7221	161.3008	229.9863	-0.0018	0.0001	-0.0073	0.0845
BR-A2QD1F3	24837.8763	160.3778	230.0552	24837.8769	160.3778	230.0003	0.0234	0.0001	-0.0429	0.0755
BR-A2QD1F4	24879.5782	160.8577	230.0554	24879.5934	160.8578	230.0015	0.0152	0.0001	-0.0540	0.0798
BR-A2QD1F5	24838.5188	162.8585	230.0941	24838.5932	162.8585	230.1047	0.0794	-0.0000	0.0108	0.0774
BR-A2QD1F2	24504.4508	163.3869	230.0588	24504.4974	163.3869	230.0838	0.0466	0.0001	0.0251	0.1167
BR-A2QD1F3	24692.5593	163.4531	230.0316	24692.6108	163.4532	230.0332	0.0515	0.0001	0.0016	0.0990
BR-A2BD2F1	24726.4093	162.9257	230.0266	24726.4833	162.9257	230.0061	0.0739	0.0000	-0.0205	0.0770
BR-A2BD2F2	25082.1284	155.8377	180.0124	25082.1588	155.8378	180.0154	0.0283	0.0001	0.0030	0.0901
BR-A2BD2F3	25327.8763	156.0349	180.0349	25328.0349	156.0349	180.0769	0.1620	0.0001	0.0049	0.0985
BR-A2BD2F4	25334.6549	154.7109	180.0490	25334.6111	154.7109	180.1169	0.0542	-0.0000	0.0719	0.0925
BR-A2BD2F5	25546.8382	153.4803	180.0251	25546.8909	153.4801	180.0449	0.0428	-0.0002	0.0198	0.1095
BR-A2BD2F6	25252.2453	153.3543	180.0129	25252.2638	153.3542	180.0027	0.0185	-0.0002	-0.0102	0.0779
BR-A2BF1F1	24794.8758	160.0815	168.0177	24794.8358	160.0817	168.0500	-0.0428	0.0002	0.0323	0.1158
BR-A2BF1F2	24942.0180	160.1526	166.0358	24942.0416	160.1527	166.0481	0.0238	0.0002	0.0123	0.0922
BR-A2BF1F3	24950.7441	158.8880	168.0110	24950.7468	158.8880	168.0048	0.0027	0.0000	-0.0084	0.0281
BR-A2BF1F4	25170.6251	157.7051	168.0328	25170.6251	157.7051	168.0328	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BR-A2BF1F5	24974.6758	167.8175	168.0380	24974.8945	167.8173	168.1089	-0.0844	-0.0002	0.0888	0.1278
BR-A2BF1F6	25183.4657	156.5368	71.0130	25183.4131	156.5363	70.9802	-0.0568	-0.0003	-0.0528	0.1568
BR-A2BF1F7	25165.3992	156.4073	71.0130	25165.3107	156.4070	70.9369	-0.0795	-0.0003	-0.0771	0.1441
BR-A2CX1F1	25327.8484	152.8093	124.0410	25327.8516	152.8091	124.0561	0.0051	-0.0002	0.0151	0.1098
BR-A2CX1F2	25522.4178	152.8636	124.0190	25522.3923	152.8636	124.0603	-0.0255	-0.0001	0.0413	0.0540
BR-A2CX1F3	25573.8942	152.8778	74.3460	25573.8385	152.8777	74.3985	-0.0258	-0.0001	0.0255	0.0942
BR-A2CX1F4	25573.9515	152.8777	-74.2530	25573.8994	152.8776	-74.1468	0.0378	-0.0001	0.1052	0.1176
BR-A2SF1F1	25127.8238	158.9137	168.0430	25127.8335	158.9137	168.0535	0.0092	-0.0001	0.0405	0.0495
BR-A2SF1F2	24993.2898	158.7508	79.2480	24993.3154	158.7505	79.2717	0.0256	-0.0000	0.0237	0.0353
BR-A2SF1F3	25263.2313	156.8758	79.0380	25263.2314	156.8758	79.0742	0.0001	-0.0000	0.0382	0.0382
BR-A2BD3F1	25563.1080	148.0895	178.9780	25563.1441	148.0893	178.9727	0.0354	-0.0002	-0.0059	0.0927
BR-A2BD3F2	25882.2328	148.1407	180.0258	25882.2888	148.1404	180.0331	0.0563	-0.0003	0.0073	0.1542
BR-A2BD3F3	25799.4979	148.8481	179.9381	25799.5049	148.8478	179.9426	0.0070	-0.0003	0.0045	0.1355
BR-A2BD3F4	25975.0653	145.8104	180.0287	25975.0781	145.8102	179.9798	0.0078	-0.0003	-0.0491	0.1242
BR-A2BD3F5	25977.1138	146.5302	180.0183	25977.1164	146.5297	179.9699	0.0036	-0.0005	-0.0454	0.2357
BR-A2BF2F1	25338.7900	151.9488	168.0480	25338.7938	151.9490	168.0038	0.0038	0.0002	-0.0422	0.0924
BR-A2BF2F2	25572.7333	151.9934	168.0240	25572.7577	151.9936	168.0780	0.0244	0.0002	0.0540	0.0540
BR-A2BF2F3	25557.6944	150.7588	168.0370	25557.6708	150.7589	168.1052	-0.0238	0.0001	0.0682	0.0894
BR-A2BF2F4	25715.0740	149.5787	166.2500	25715.0924	149.5790	166.2531	0.0178	0.0003	0.0031	0.1442
BR-A2BF2F5	25537.7880	149.5176	166.0500	25537.7582	149.5176	166.0857	-0.0270	-0.0000	0.0327	0.0475
BR-A2BF2F6	25957.8885	148.8934	71.0130	25957.7392	148.8914	70.9576	0.0487	-0.0020	-0.0554	0.8828
BR-A2BF2F7	25955.8146	148.7851	71.0130	25955.8146	148.7851	71.0104	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BR-A2CY2F1	25916.9061	145.0097	150.0720	25916.9432	145.0096	150.0801	0.0371	-0.0001	0.0081	0.0658
BR-A2CY2F2	25752.0157	144.9878	149.9770	25752.0000	144.9877	149.9742	-0.0158	-0.0000	-0.0208	0.0258
BR-A2CY2F3	25966.7585	145.0163	97.9700	25966.7738	145.0163	98.0297	0.0151	-0.0000	0.0327	0.0387
BR-A2CY2F4	25966.7719	145.0163	-97.9700	25966.8367	145.0164	-97.9736	0.0648	0.0001	0.0394	0.8895
BR-A2BD4F1	25839.0896	140.0785	180.1029	25839.0871	140.0784	180.0834	-0.0025	-0.0001	-0.0195	0.0349
BR-A2BD4F2	26139.0700	140.0872	180.0837	26139.0901	140.0872	180.0854	0.0261	0.0000	-0.0251	0.0395
BR-A2BD4F3	26038.7614	138.8160	180.0889	26038.7779	138.8169	180.0725	0.0168	-0.0001	-0.0162	0.0235
BR-A2BD4F4	26179.4814	137.8968	180.0258	26179.5501	137.8968	180.0568	0.0688	-0.0001	0.0322	0.8518
BR-A2BD4F5	25879.0441	137.5319	179.9740	25879.9547	137.5317	180.0098	0.1106	-0.0003	0.0358	0.1237
BR-A2BF3F1	25776.9312	144.1311	168.0332	25776.9107	144.1313	165.9951	-0.0205	0.0002	-0.0381	0.8828
BR-A2BF3F2	25956.8878	144.1487	168.0235	25956.7097	144.1489	165.9914	0.0220	0.0001	-0.0321	0.0848
BR-A2BF3F3	25905.1148	142.9306	166.0499	25905.1061	142.9307	166.0138	-0.0088	0.0001	-0.0381	0.0513
BR-A2BF3F4	26027.2579	141.7509	166.0667	26027.2252	141.7509	165.9932	-0.0327	0.0000	-0.0735	0.8809
BR-A2BF3F5	25947.6978	141.7168	166.0581	25947.6914	141.7167	166.0172	0.0236	-0.0001	-0.0418	0.0533
BR-A2BF3F6	25959.0481	140.8268	71.0130	25959.0481	140.8268	70.9448	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BR-A2BF3F7	25958.5578	140.8104	71.0130	25958.6488	140.8093	70.9302	0.0880	-0.0021	-0.0828	0.9411

Part 2: Deviations of All Elements

Vector Group										
CYU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups: REFERENCE FINAL to FID ONLY										
Name	Begin			End			Delta			
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag
BR-A2SD1F1	26964.3269	140.9071	168.9940	26964.3568	140.9071	168.9501	0.0307	-0.0000	-0.0439	0.6865
BR-A2SD1F2	25817.2415	140.8802	79.5170	25817.2864	140.8801	79.5212	0.0569	-0.0001	0.0042	0.8859
BR-A2SD1F5	26082.0233	140.6300	79.5530	26081.9722	140.6299	79.5254	-0.0591	-0.0001	-0.0278	0.8865
BR-A2BF4F2	26119.4182	136.1928	166.0100	26119.4322	136.1929	166.0743	0.0140	0.0000	0.0943	0.8659
BR-A2BF4F3	26032.2291	134.9973	166.0250	26032.2075	134.9973	166.0687	-0.0204	-0.0000	0.0411	0.8505
BR-A2BF4F4	26190.2369	133.9016	166.0300	26190.2131	133.9016	166.0569	-0.0229	-0.0000	0.0286	0.8654
BR-A2BF4F5	26939.3684	133.7935	166.0250	26939.3263	133.7933	166.0347	-0.0421	-0.0001	0.0097	0.8806
BR-A2BD0F1	25880.2236	132.4526	180.0308	25880.1990	132.4527	180.0362	-0.0246	0.0001	0.0254	0.8610
BR-A2BD0F2	26179.8410	132.4250	179.9842	26179.8258	132.4251	179.9882	-0.0154	-0.0001	0.0040	0.8686
BR-A2BD0F3	26040.2053	131.1759	180.0378	26040.1989	131.1759	180.0524	-0.0064	0.0000	0.0148	0.8194
BR-A2BD0F4	26139.9813	129.0765	180.0126	26139.9983	129.0762	180.0465	0.0150	-0.0001	0.0339	0.8472
BR-A2BD0F5	25839.8025	128.6190	179.9639	25839.8949	128.6189	180.0184	-0.0076	-0.0001	0.0245	0.8399
BR-A2BF5F1	25948.3302	128.2762	166.0230	25948.3129	128.2763	166.0178	-0.0173	0.0000	-0.0044	0.8213
BR-A2BF5F2	26027.2100	128.2421	166.0230	26027.7351	128.2422	166.0200	0.0041	-0.0001	-0.0020	0.8275
BR-A2BF5F3	26905.5470	127.0565	166.0290	26905.5280	127.0564	166.0319	-0.0190	-0.0000	0.0029	0.8285
BR-A2BF5F4	25957.3935	125.8443	166.0230	25957.3883	125.8442	166.0139	-0.0052	-0.0002	-0.0091	0.8170
BR-A2BF5F5	26777.5247	125.8616	166.0170	26777.4877	125.8617	166.0137	-0.0370	-0.0001	-0.0033	0.8734
BR-A2BM4F1	25998.8434	129.4921	71.0130	25998.8339	129.4943	71.1109	-0.0098	0.0022	0.0978	0.9682
BR-A2BM4F2	25994.3403	129.3845	71.0130	25994.4361	129.3898	71.1110	0.0058	0.0021	0.0390	0.9644
BR-A2SD2F1	26139.9813	129.0765	180.0126	26139.9983	129.0762	180.0465	0.0150	-0.0001	0.0339	0.8472
BR-A2SD2F2	25817.2415	140.8802	79.5170	25817.4048	129.1042	79.3820	-0.0410	-0.0002	-0.1197	1.0337
BR-A2SD2F5	26082.0233	140.6300	79.5530	26082.2455	129.0520	79.3710	-0.0287	0.0001	0.0230	0.8788
BR-A2BD0F1	25877.7742	124.4620	180.0280	25877.7025	124.4621	180.0143	-0.0321	0.0001	-0.1117	1.0496
BR-A2BD0F2	25975.8485	124.3822	180.0140	25975.8428	124.3822	180.0241	-0.0057	0.0000	0.0101	0.8304
BR-A2BD0F3	25800.2810	123.1442	180.0340	25800.2608	123.1442	180.0691	-0.0208	-0.0000	0.0351	0.8409
BR-A2BD0F4	25963.2627	121.8519	180.0000	25963.2496	121.8518	180.0602	-0.0161	-0.0001	0.0602	0.8992
BR-A2BF6F1	25536.8426	121.0023	179.8986	25536.8140	121.0023	179.9180	-0.0214	-0.0002	0.0170	0.8161
BR-A2BF6F2	26538.4387	120.4756	166.0360	26538.4509	120.4760	165.9951	0.0211	0.0000	-0.0708	1.0337
BR-A2BF6F3	26716.3483	120.4147	166.0320	26716.3387	120.4149	165.9989	-0.0096	0.0001	-0.0331	0.8740
BR-A2BF6F4	25558.5500	119.2348	166.0450	25558.5101	119.2348	166.0380	-0.0398	0.0000	-0.0004	0.8400
BR-A2BF6F5	25573.8799	118.0004	166.0140	25573.8316	118.0002	166.0338	0.0517	-0.0002	0.0198	0.8913
BR-A2BF6F6	25394.7194	116.0449	166.0520	25394.7329	116.0449	166.0315	0.0135	-0.0001	-0.0205	0.8333
BR-A2BM5F1	25686.2322	121.2285	71.0130	25686.2910	121.2285	71.1567	-0.0323	0.0001	0.1437	1.1499
BR-A2BM5F2	25686.2322	121.1002	71.0130	25686.2843	121.1002	71.1380	-0.0168	0.0000	0.0770	0.8681
BR-A2CV3F1	25917.3234	150.1020	150.1020	25917.2117	124.9638	150.1869	-0.0207	-0.0000	0.0640	0.8678
BR-A2CV3F2	25782.8562	125.0054	160.1700	25782.8184	125.0058	160.1410	-0.0418	-0.0000	-0.0290	0.8159
BR-A2CV3F3	25987.9739	124.9773	97.8550	25987.2558	124.9772	97.8445	-0.0381	-0.0002	0.0895	1.1190
BR-A2CV3F4	25987.3457	124.9782	-97.7780	25987.4004	124.9775	-97.7036	0.0647	-0.0000	0.0744	0.3368
BR-A2BD7F1	25252.9814	116.6413	180.0299	25252.9617	116.6414	179.9842	-0.0217	0.0001	-0.0457	0.8588
BR-A2BD7F2	25547.9104	116.5154	180.0488	25547.8879	116.5155	180.0075	-0.0224	0.0001	0.0027	0.8362
BR-A2BD7F3	25335.8529	115.2847	180.0498	25335.9119	115.2847	180.0494	-0.0410	0.0000	0.0006	0.8416
BR-A2BD7F4	25390.4987	113.9611	180.0083	25390.4295	113.9612	180.0344	-0.0591	0.0000	0.0281	0.8686
BR-A2BD7F5	25083.3537	114.0577	180.0018	25083.2571	114.0577	179.9605	-0.0688	0.0000	-0.0413	1.0555
BR-A2BF7F1	24976.2013	112.3704	166.0830	24976.1435	112.3704	166.0683	-0.0577	0.0000	-0.0747	0.9049
BR-A2BF7F2	25152.0568	112.2888	166.0140	25152.0150	112.2888	165.9473	-0.0417	0.0000	-0.0607	0.8801
BR-A2BF7F3	24962.0411	111.1057	166.1200	24962.0119	111.1057	166.1046	-0.0292	-0.0001	-0.0154	0.8621
BR-A2BF7F4	24943.0602	109.8414	166.0420	24943.0337	109.8412	166.0175	-0.0285	-0.0001	-0.0248	0.8727
BR-A2BF7F5	24755.7180	109.6123	166.0390	24755.6783	109.6121	166.0202	-0.0397	-0.0002	-0.0098	0.8627
BR-A2BM6F1	25188.4936	113.5894	71.0130	25188.5590	113.5878	71.0818	0.0731	0.0013	0.6688	0.8729
BR-A2BM6F2	25154.8627	113.4571	71.0130	25154.8582	113.4584	71.0511	-0.0046	0.0013	0.8381	0.8417
BR-A2CX2F1	25328.9027	117.1856	124.0880	25328.8687	117.1856	124.0530	0.0440	-0.0000	-0.0350	0.8729
BR-A2CX2F2	25523.2551	117.1304	124.0420	25523.2556	117.1306	124.0208	0.1005	0.0001	-0.0212	1.1179
BR-A2CX2F3	25574.8452	117.1157	74.5370	25574.8310	117.1159	74.4882	0.0857	0.0003	-0.0708	0.8196
BR-A2CX2F4	25574.8883	117.1151	-74.0490	25575.0318	117.1153	-74.1963	0.0435	0.0002	-0.1493	1.1610
BR-A2SF2F1	25129.0527	113.1790	158.8250	25129.0687	113.1759	158.8001	0.0161	-0.0001	-0.0246	0.8486
BR-A2SF2F2	24994.1871	113.2389	79.4220	24994.2542	113.2389	79.3961	0.0071	0.0000	-0.0259	0.8749
BR-A2SF2F3	25294.0132	113.1153	79.5060	25294.0782	113.1152	79.5158	0.0608	-0.0001	0.0078	0.8675
BR-A2BD8F1	24358.0987	104.8241	180.0253	24358.0971	104.8241	180.0481	0.0004	-0.0000	0.0028	0.8227
BR-A2BD8F1	24358.0987	104.8241	180.0253	24358.1009	104.8238	180.0634	0.0042	-0.0003	0.0381	0.8186
BR-A2BD8F2	24653.1395	104.6957	179.9986	24653.1000	104.6958	180.0694	0.0204	0.0001	0.0708	0.8698
BR-A2BD8F2	24653.1395	104.6957	179.9986	24653.2188	104.6955	180.0731	0.0803	-0.0002	0.0745	1.0304
BR-A2BD8F3	24443.1777	103.4188	179.9999	24443.2687	103.4184	180.0267	0.0890	-0.0002	0.0288	1.1328
BR-A2BD8F4	24470.0350	102.0469	180.0447	24470.0110	102.0468	180.0719	-0.0240	-0.0000	0.0132	0.8284
BR-A2BD8F5	24470.0350	102.0469	180.0447	24470.1386	102.0469	180.0364	0.0608	-0.0000	0.0028	0.8407
BR-A2BD8F5	24172.7362	102.1438	180.0095	24172.7710	102.1437	180.0168	0.0318	-0.0001	0.0083	0.8460
BR-A2BD8F5	24172.7362	102.1438	180.0095	24172.8753	102.1436	179.9797	0.1361	-0.0002	-0.0116	1.0777
BR-A2BM7F1	24532.8648	105.3959	71.0130	24532.8087	105.3915	73.1463	-0.1561	-0.0044	2.1363	2.8553
BR-A2BM7F2	24525.0589	105.2615	71.0130	24525.4712	105.2571	73.0909	-0.1877	-0.0044	2.0779	2.8035
BR-A2CX3F1	24590.9191	107.9188	124.0740	24590.9590	107.9186	124.0972	0.0444	-0.0002	0.0232	1.1131
BR-A2CX3F2	24754.2807	107.8442	124.0490	24754.2941	107.8442	124.0881	0.0435	-0.0001	0.0481	0.8697
BR-A2CX3F3	24835.8595	107.8234	74.0889	24835.8395	107.8235	74.1569	0.0300	-0.0001	0.0028	1.1153
BR-A2CX3F4	24835.8850	107.8227	-74.2860	24835.4369	107.8228	-74.2091	0.0510	0.0001	0.0589	0.9993

Part 2: Deviations of All Elements

Name	Vector Group										Delta			
	CVU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups: REFERENCE.FINAL to FID ONLY					End					dR	dTheta	dZ	Mag
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2								
BR-A2CY4F1	24639.6473	105.8316	150.1850	24639.6617	105.8316	150.2078	0.0144	0.0000	0.0228	0.0271				
BR-A2CY4F2	24475.7850	105.8815	150.0500	24475.8071	105.8818	150.0146	0.0080	0.0003	-0.0414	0.1421				
BR-A2CY4F3	24689.1538	105.8168	98.0540	24689.1977	105.8168	98.1501	0.0439	0.0001	0.0691	0.1200				
BR-A2CY4F4	24689.1532	105.8162	-97.8920	24689.4242	105.8165	-97.7899	0.2711	0.0003	0.0311	0.3185				
BR-A2QD2F1	24652.0350	108.9940	230.1133	24652.0720	108.9940	230.1440	0.0378	0.0000	0.0307	0.0504				
BR-A2QD2F2	24684.3294	109.2190	230.0813	24684.3839	109.2190	230.0802	0.0545	-0.0000	-0.0211	0.0580				
BR-A2QD2F3	24681.0212	109.1365	230.0213	24681.0383	109.1365	230.0327	0.0172	-0.0000	0.0114	0.0209				
BR-A2QD2F4	24639.0269	108.6153	230.0489	24639.0736	108.6153	230.0626	0.0466	0.0000	0.0137	0.0489				
BR-A2QG2F1	24505.8558	106.6048	229.9978	24505.9328	106.6045	229.9787	0.0770	-0.0001	-0.0209	0.0949				
BR-A2QG2F2	24539.7031	107.1362	229.9753	24539.7911	107.1360	229.9308	0.0880	-0.0001	-0.0445	0.1128				
BR-A2QG2F3	24727.5811	107.0694	230.0223	24727.6395	107.0692	229.9964	0.0584	-0.0001	-0.0259	0.0887				
BR-A2QG2F4	24653.6170	106.5415	230.0248	24654.0056	106.5416	230.0232	0.0685	0.0001	-0.0016	0.0625				
BR-A2QF2F1	24078.4295	100.3682	229.9512	24078.4468	100.3687	230.0388	0.0113	-0.0005	0.0378	0.2139				
BR-A2QF2F2	24110.0050	100.9337	229.9840	24110.0091	100.9332	230.0297	0.0032	-0.0005	0.0467	0.1658				
BR-A2QF2F3	24305.6110	100.8486	230.1070	24305.6426	100.8482	230.1152	0.0307	-0.0004	0.0082	0.1697				
BR-A2QF2F4	24263.4001	100.3152	230.0880	24263.4607	100.3147	230.1120	0.0605	-0.0005	0.0260	0.2252				
BR-XS8M1F1	24029.1833	99.5400	95.1024	24029.0917	99.5458	95.2358	-0.0617	-0.0003	0.1334	0.1979				
BR-XS8M1F2	24188.8401	99.4837	95.1732	24188.8388	99.4834	95.3168	-0.0043	-0.0003	0.1454	0.1824				
BR-XS8M1F3	24014.4018	99.3338	94.9768	24014.3430	99.3337	95.1411	-0.0589	-0.0001	0.1643	0.1759				
BR-XS8M1F4	24178.4295	100.3682	229.9512	24178.4468	100.3687	230.0388	0.0113	-0.0005	0.0378	0.2139				
BR-XS8M2F1	23773.7499	94.2949	94.9439	23774.0020	94.2948	94.9178	0.2521	0.0001	-0.0263	0.2923				
BR-XS8M2F2	23932.9617	94.2659	94.9293	23933.2452	94.2680	94.9030	0.2835	0.0001	-0.0282	0.2903				
BR-XS8M2F3	23767.3762	94.0789	94.9408	23767.5739	94.0791	94.8510	0.1978	0.0002	-0.0097	0.2336				
BR-XS8M2F4	23926.5984	94.0507	94.9208	23926.8030	94.0510	94.8549	0.2046	0.0003	-0.0057	0.2503				
BR-XSCXW1F1	24039.0800	99.9405	132.5490	24039.0750	99.9408	132.6594	-0.0110	0.0003	0.1164	0.1601				
BR-XSCXW1F2	24232.2351	99.8008	132.5270	24232.2228	99.8008	132.0908	-0.0123	-0.0002	0.0818	0.1162				
BR-XSCXW1F3	23759.8099	99.8402	82.4723	23759.8115	99.8393	82.5592	-0.0018	-0.0001	0.0372	0.1484				
BR-XSCXW1F4	24283.6845	99.8408	-82.9520	24283.6878	99.8403	-82.3778	-0.0022	-0.0003	0.0063	0.1065				
BR-XSK1F1	23938.5547	98.8841	-86.0000	23938.7238	98.8846	-85.7226	0.1690	0.0004	0.2774	0.3669				
BR-XSK1F2	24185.5862	98.7927	-86.0000	24185.6362	98.7931	-85.7287	0.0500	0.0004	0.2713	0.3300				
BR-XSK1F3	24016.3107	95.6082	-86.0000	24016.4674	95.6083	-86.0042	0.1567	0.0001	-0.0042	0.1374				
BR-XSK1F4	23767.5199	95.6871	-86.0000	23767.8339	95.6873	-85.9301	0.3140	0.0002	0.0999	0.3015				
BR-XSPK1F1	23971.7043	84.8607	71.0130	23972.5481	84.8603	71.4895	0.8418	-0.0004	0.4755	0.9794				
BR-XSPK1F2	23759.8099	91.9271	138.3700	23759.7781	91.9258	138.3983	-0.0038	-0.0001	0.0318	0.1121				
BR-XSPK1F3	23883.7459	91.8182	138.3900	23883.7619	91.8182	138.3778	0.0107	0.0002	-0.0023	0.1499				
BR-XSPK1F4	23888.3022	90.7310	138.3700	23888.2723	90.7317	138.3643	-0.0299	0.0001	-0.0035	0.0833				
BR-XSMP1F1	23779.3112	90.7349	138.3800	23778.2315	90.7350	138.4115	-0.0797	0.0000	0.0317	0.0888				
BR-XSMP1F2	23916.0079	85.8400	94.9600	23916.1409	85.8404	95.0238	0.1330	0.0004	0.0638	0.2164				
BR-XSMP1F3	23762.8862	85.7050	94.9500	23763.0151	85.7039	94.8388	0.2529	-0.0011	-0.1112	0.2742				
BR-XSMP1F4	23922.8981	85.7332	94.9500	23922.8157	85.7333	94.8065	-0.0824	0.0001	-0.0435	0.0994				
BR-XSK1F2F1	23862.2852	85.1390	71.0130	23862.3558	85.1348	70.9614	0.0675	-0.0014	-0.0318	0.1576				
BR-XSK1F2F2	23987.2781	84.9973	71.0130	23987.2169	84.9957	71.0569	-0.0592	-0.0016	0.0428	0.0849				
BR-A3Q1F1	24119.2977	79.0684	229.9640	24119.4341	79.0683	229.9338	0.1384	-0.0001	-0.0302	0.1403				
BR-A3Q1F2	24076.7134	79.0036	230.0480	24076.8087	79.0038	230.0332	0.0953	0.0002	-0.0148	0.1525				
BR-A3Q1F3	24263.7130	79.0648	230.0800	24263.6294	79.0647	230.1460	-0.0842	-0.0001	0.0660	0.1201				
BR-A3Q1F4	24305.9471	78.1513	230.0100	24305.9104	78.1513	230.0550	-0.0305	0.0000	0.0450	0.0584				
BR-XS8M4F1	24014.2556	80.8654	94.9089	24014.2583	80.8653	94.8544	0.0007	-0.0000	-0.0548	0.0581				
BR-XS8M4F2	24172.1657	80.7272	94.8968	24172.1584	80.7270	94.8027	-0.0909	-0.0001	-0.0961	0.1141				
BR-XS8M4F3	24028.1102	80.4537	95.0052	24028.7140	80.4536	95.0428	-0.0972	-0.0001	0.0378	0.0837				
BR-XS8M4F4	24186.8725	80.5168	95.0237	24186.7796	80.5168	95.0431	-0.0929	0.0001	0.0194	0.1140				
BR-XSCXW2F1	24038.8883	80.0589	132.5380	24038.9325	80.0587	132.5371	-0.0558	-0.0001	0.0111	0.0832				
BR-XSCXW2F2	24232.3578	80.1401	132.5500	24232.2986	80.1405	132.5468	-0.0592	0.0004	-0.0032	0.1813				
BR-XSCXW2F3	24283.6971	80.1599	82.4180	24283.5523	80.1605	82.4498	-0.1448	0.0006	0.0316	0.2084				
BR-XSCXW2F4	24283.6395	80.1599	-82.5530	24283.5725	80.1601	-82.5911	-0.0670	0.0001	-0.0381	0.0990				
BR-A3BD1F1	24172.3587	77.8575	179.9916	24172.4688	77.8575	180.0452	0.1131	-0.0000	0.0536	0.1251				
BR-A3BD1F2	24469.6347	77.9548	179.9957	24469.7716	77.9548	180.0246	0.1398	0.0000	0.0289	0.1478				
BR-A3BD1F3	24443.0095	78.8533	179.9776	24443.1809	78.8531	179.9564	0.1610	0.0000	-0.0223	0.1742				
BR-A3BD1F4	24683.1612	75.3083	180.0298	24683.2965	75.3081	179.9408	0.1383	-0.0002	-0.0080	0.1400				
BR-A3BD1F5	24368.1149	75.1775	179.9829	24368.2500	75.1773	179.9310	0.1351	-0.0002	0.0519	0.1693				
BR-A3BP1F1	24525.6589	74.7386	71.0130	24526.0123	74.7370	71.4081	0.3633	-0.0015	-0.0651	0.8348				
BR-A3BP1F2	24532.8648	74.8041	71.0130	24533.0581	74.8025	71.3918	0.3634	-0.0015	0.3788	0.8519				
BR-A3CX1F1	24784.1578	72.1575	124.0000	24784.0831	72.1578	123.9991	-0.0745	0.0003	-0.0090	0.1804				
BR-A3CX1F2	24650.7814	72.0828	124.0000	24650.6853	72.0827	123.9404	-0.0961	0.0002	-0.0599	0.1938				
BR-A3CX1F3	24443.0095	72.1780	124.0000	24443.0996	72.1780	124.1460	0.1460	0.0000	-0.0045	0.1742				
BR-A3CX1F4	24835.1874	72.1780	-74.3130	24835.4229	72.1788	-74.3128	0.2855	0.0008	0.0004	0.4937				
BR-A3CY1F1	24639.5580	74.1684	150.0000	24639.5484	74.1682	149.9510	-0.0096	-0.0002	-0.0490	0.1158				
BR-A3CY1F2	24475.9315	74.1204	150.1185	24478.0283	74.1203	150.0871	0.0948	-0.0001	-0.0324	0.1052				
BR-A3CY1F3	24689.0913	74.1835	97.7708	24689.1714	74.1827	97.7089	0.0801	-0.0009	-0.0939	0.3842				
BR-A3CY1F4	24689.0913	74.1835	-97.8286	24689.1628	74.1822	-98.0127	0.0714	-0.0013	-0.0841	0.8380				
BR-A3QD1F1	24694.2248	70.7818	230.1291	24694.2327	70.7817	230.1071	0.0079	0.0002	-0.0220	0.0696				
BR-A3QD1F2	24694.0036	71.3067	230.0585	24692.0539	71.3068	230.0464	0.0339	0.0002	-0.0131	0.0776				
BR-A3QD1F3	24836.0132	71.3852	229.9496	24836.0224	71.3852	229.9095	0.0793	-0.0000	-0.0401	0.0960				

Part 2: Deviations of All Elements

Name	Vector Group											Delta			
	CYU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups: REFERENCE FINAL to FID ONLY											dR	dTheta	dZ	Mag
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2									
BR-A3QD1F4	24880.9182	70.8639	220.9722	24880.9288	70.8639	220.9165	0.0083	-0.0000	-0.0557	0.0677					
BR-A3Q01F1	24539.7390	72.8033	230.0811	24539.8240	72.8033	230.0192	0.0850	-0.0002	-0.0619	0.1284					
BR-A3Q01F2	24505.8121	73.3948	230.0499	24505.8131	73.3947	229.9388	0.0010	-0.0000	-0.1108	0.1174					
BR-A3Q01F3	24683.9800	72.9303	230.0075	24683.9829	73.4578	229.8081	0.0029	-0.0000	-0.1488	0.1490					
BR-A3Q01F4	24727.8204	66.9433	180.0113	25083.0915	65.9431	179.9887	-0.0832	-0.0000	-0.0258	0.0951					
BR-A3B02F1	26083.1647	66.0401	180.0073	26380.2019	66.0400	179.9408	-0.0075	-0.0000	-0.0685	0.0704					
BR-A3B02F3	26335.8189	64.7165	179.8819	26335.9041	64.7164	179.9119	-0.0148	-0.0001	-0.0700	0.0825					
BR-A3B02F4	26547.0400	83.4859	179.9931	26547.9888	83.4859	179.9590	0.0198	-0.0000	-0.0341	0.0584					
BR-A3B02F5	26253.0301	63.5957	179.9943	26253.0745	63.5956	179.9975	0.0444	-0.0000	0.0032	0.0757					
BR-A3B1F1	24765.9587	70.0880	186.0175	24765.8427	70.0880	186.0063	-0.1160	-0.0000	-0.0112	0.1183					
BR-A3B1F2	24943.3174	70.1590	186.0081	24943.2594	70.1590	186.0181	-0.0682	-0.0000	0.0130	0.1037					
BR-A3B1F3	24982.9429	69.5945	186.0382	24981.9322	69.5945	186.0234	-0.1027	-0.0000	-0.0148	0.1101					
BR-A3B1F4	26182.1154	67.7118	186.0258	26182.0212	67.7118	186.0349	-0.0941	0.0000	0.0001	0.0948					
BR-A3B1F5	24976.1771	67.6240	186.0194	24976.0809	67.6240	186.0409	-0.0961	0.0000	0.0015	0.0998					
BR-A3BPM2F1	26154.5627	66.5429	71.0130	26154.6096	66.5407	71.0646	0.0469	-0.0022	0.0516	0.9584					
BR-A3BPM2F2	26166.4859	66.4134	71.0130	26166.4001	66.4117	71.0172	-0.0859	-0.0019	0.0042	0.8520					
BR-A3CX2F1	26328.8982	62.8184	124.0050	26328.8308	62.8182	123.9872	-0.0558	-0.0002	-0.0178	0.9008					
BR-A3CX2F2	26523.1781	62.8709	124.0000	26523.1203	62.8704	123.9947	-0.0578	-0.0001	-0.0153	0.8927					
BR-A3CX2F3	26574.8249	62.8842	124.0000	26574.7577	62.8842	123.9947	-0.0648	-0.0001	-0.0134	0.9122					
BR-A3CX2F4	26574.8158	62.8848	-74.1510	26574.7000	62.8848	-74.1458	-0.1185	0.0000	0.0054	0.1210					
BR-A3SF1F1	26120.0003	66.8227	159.0300	26120.9683	66.8227	159.0628	-0.0382	0.0000	0.0328	0.0835					
BR-A3SF1F2	24994.2238	66.7613	79.6490	24994.2029	66.7613	79.6215	-0.0197	-0.0000	-0.0275	0.0742					
BR-A3SF1F5	26264.0583	66.8865	79.5560	26264.0738	66.8865	79.5727	0.0155	-0.0000	0.0137	0.2622					
BR-A3B03F1	26563.8052	58.0973	180.0209	26563.8880	58.0974	180.0747	0.0828	0.0000	0.0478	0.9958					
BR-A3B03F2	26862.9237	58.1484	180.0117	26863.0175	58.1484	179.9434	0.0888	-0.0000	-0.0693	0.1120					
BR-A3B03F3	26880.2003	58.8586	180.0080	26880.2760	58.8586	180.0070	0.0767	-0.0000	0.0145	0.9423					
BR-A3B03F4	26975.7953	58.8165	180.0113	26975.7880	58.8163	179.9975	0.0809	-0.0002	-0.0138	0.1108					
BR-A3B03F5	26677.8227	55.5382	180.0266	26677.8735	55.5380	180.0070	0.0508	-0.0002	-0.0198	0.9068					
BR-A3B2F1	26394.7382	61.9548	186.0390	26394.6957	61.9548	186.0567	-0.0425	-0.0000	0.0177	0.7447					
BR-A3B2F2	26573.6107	61.9996	186.0200	26573.5822	61.9997	186.0039	-0.0285	0.0000	-0.0161	0.9079					
BR-A3B2F3	26555.4799	60.7650	186.0390	26555.5201	60.7651	185.9733	0.0468	0.0000	-0.0957	0.0811					
BR-A3B2F4	26516.5038	59.5582	186.0280	26516.4488	59.5582	185.9533	0.0430	-0.0000	-0.0647	0.8828					
BR-A3B2F5	26588.5729	59.8299	186.0390	26588.5133	59.8299	186.0280	0.0606	-0.0000	-0.0147	0.9423					
BR-A3BPM3F1	26686.4031	55.0947	71.0130	26686.4611	55.0947	71.0423	0.0582	-0.0002	0.0299	0.8537					
BR-A3BPM3F2	26686.3232	55.7115	71.0130	26686.2760	55.7662	71.0310	-0.0472	-0.0023	0.0180	0.8378					
BR-A3CY2F1	26917.4970	55.0159	150.0480	26917.4749	55.0150	150.0402	-0.0221	-0.0000	-0.0078	0.1205					
BR-A3CY2F2	26782.4529	54.9952	180.0510	26782.4543	54.9952	180.0511	0.0014	-0.0000	0.0101	0.0112					
BR-A3CY2F3	26967.3073	55.0218	97.9920	26967.3103	55.0216	98.0094	0.0030	-0.0002	0.0174	0.0843					
BR-A3CY2F4	26967.2983	55.0220	-67.8630	26967.2993	55.0222	-67.8931	-0.0020	0.0000	-0.0101	0.1071					
BR-A3B04F1	26839.7583	50.9982	180.0210	26839.7385	50.9980	180.0992	-0.0189	-0.0000	0.0172	0.1027					
BR-A3B04F2	26139.7580	50.9947	180.0300	26139.7433	50.9948	180.1477	-0.0147	-0.0001	0.1447	0.9303					
BR-A3B04F3	26040.2504	48.8204	180.0510	26040.2128	48.8201	180.0683	-0.0378	-0.0002	0.0483	0.1275					
BR-A3B04F4	26179.8232	47.5773	180.0160	26179.7923	47.5771	179.9964	-0.0309	-0.0003	-0.0198	0.1308					
BR-A3B04F5	26880.3212	47.5369	180.0280	26880.2610	47.5363	180.0171	-0.0602	-0.0000	-0.0109	0.1440					
BR-A3B3F1	26777.5971	54.1380	186.0300	26777.5232	54.1382	186.0176	-0.0740	-0.0003	-0.0124	0.1339					
BR-A3B3F2	26957.3429	54.1554	186.0400	26957.3237	54.1557	186.0401	-0.0189	0.0000	0.0001	0.1099					
BR-A3B3F3	26905.8476	52.9432	186.0810	26905.8578	52.9434	186.0828	-0.0598	-0.0000	0.0116	0.8899					
BR-A3B3F4	26027.8427	51.7575	186.0510	26027.7992	51.7578	186.1236	-0.0525	0.0000	0.0726	0.9007					
BR-A3B3F5	26846.5069	51.7235	186.0400	26846.4616	51.7235	186.0535	-0.0463	-0.0000	0.0136	0.8529					
BR-A3BPM4F1	26943.3043	50.6385	71.0130	26943.3137	50.6345	71.0443	-0.0288	-0.0010	0.0313	0.0913					
BR-A3BPM4F2	26968.8434	50.5079	71.0130	26968.8820	50.5071	71.1295	0.0387	-0.0008	0.1165	0.3983					
BR-A3SD1F1	26965.3608	50.9099	158.9787	26965.4038	50.9099	159.0082	0.0428	-0.0000	0.0285	0.8991					
BR-A3SD1F2	26817.7071	50.8874	79.4180	26817.7119	50.8871	79.4086	0.0048	-0.0000	-0.0074	0.1416					
BR-A3SD1F3	26082.5270	50.8314	79.3748	26082.5230	50.8316	79.3702	-0.0046	0.0000	-0.0046	0.8885					
BR-A3B4F1	26938.4910	46.2070	186.0147	26938.4604	46.2070	185.9958	-0.0306	-0.0000	-0.0181	0.9348					
BR-A3B4F2	26119.5111	46.1958	186.0083	26119.4814	46.1957	185.9942	-0.0407	-0.0000	-0.0121	0.9518					
BR-A3B4F3	26032.2742	39.0222	186.0167	26032.2454	39.0032	185.9901	-0.0288	-0.0000	-0.0288	0.0411					
BR-A3B4F4	26119.2700	43.8075	186.0197	26119.3038	43.8074	185.9850	0.0338	-0.0000	-0.0342	0.0601					
BR-A3B4F5	26939.3213	43.7962	186.0343	26939.3217	43.7962	185.9821	0.0004	-0.0000	-0.0522	0.8083					
BR-A3B5F1	26879.9399	42.4692	180.0507	26879.8841	42.4691	180.0494	-0.0558	-0.0000	-0.0143	0.8992					
BR-A3B5F2	26179.5916	42.4318	180.0395	26179.5412	42.4318	180.0788	-0.0504	-0.0000	0.0391	0.8885					
BR-A3B5F3	26039.8731	41.1822	180.0162	26039.8467	41.1823	180.0129	-0.0204	-0.0000	-0.0053	0.2274					
BR-A3B5F4	26139.6585	39.8137	186.0167	26139.6288	39.8137	179.9961	-0.0407	-0.0000	-0.0121	0.9518					
BR-A3B5F5	26339.3847	38.9222	179.9818	26339.3873	39.9221	179.8780	0.0028	-0.0000	-0.0838	0.9914					
BR-A3B5F6	26848.0369	38.2831	186.0778	26848.0649	38.2831	185.9480	0.0290	-0.0000	-0.1298	0.1300					
BR-A3B5F7	26027.5300	38.2400	186.0389	26027.5307	38.2400	185.9082	0.0097	-0.0000	-0.1287	0.1301					
BR-A3B5F8	26905.2640	37.0633	186.0067	26905.2590	37.0633	185.9281	-0.0074	-0.0000	-0.0789	0.0796					
BR-A3B5F9	26957.0638	36.8512	185.8695	26957.0306	36.8511	185.9730	-0.0273	-0.0000	0.0036	0.9337					
BR-A3B5F5	26777.1219	35.8885	186.0017	26777.1089	35.8885	185.9875	-0.0125	0.0000	-0.0142	0.8300					
BR-A3BPM5F1	26948.4728	39.4988	71.0130	26948.4728	39.5021	71.0467	0.0850	-0.0000	0.0037	0.5714					
BR-A3BPM5F2	26964.0461	39.3710	71.0130	26964.1653	39.3744	71.0220	0.0060	0.0000	0.0060	1.8160					

Part 2: Deviations of All Elements

Name	Vector Group											Delta			
	CVU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups: REFERENCE.FINAL to FID ONLY											dR	dTheta	dZ	Mag
	Begin	R1			R2			End							
	Theta1	Z1	Theta2	Z2	Theta3	Z3									
BR-A3SD2F1	2694.7703	39.0037	168.9600	2694.7149	39.0040	169.0148	-0.0657	0.0003	0.0348	0.1660					
BR-A3SD2F2	2581.0704	39.1140	79.3050	2581.1775	39.1140	79.2672	0.1211	0.0000	-0.0378	0.1278					
BR-A3SD2F5	26021.6945	39.0712	79.8870	26021.8142	39.0713	79.8474	-0.0803	0.0001	-0.0398	0.0925					
BR-A3SD0F1	26077.0880	34.4669	180.0569	26077.1297	34.4660	180.0463	0.0417	0.0001	-0.0086	0.0573					
BR-A3SD0F2	26795.0692	34.3690	180.0237	26795.0685	34.3690	179.9940	0.0193	0.0000	-0.0297	0.0365					
BR-A3SD0F3	26799.7176	33.1513	180.0245	26799.7057	33.1511	179.9427	-0.0119	-0.0002	-0.0818	0.1115					
BR-A3SD0F4	26882.8591	31.8588	179.9412	26882.8256	31.8585	179.8621	-0.0338	-0.0001	-0.0791	0.0990					
BR-A3SD0F5	26563.8316	31.9098	180.0007	26563.8656	31.9094	179.8706	-0.1360	-0.0002	-0.1301	0.2033					
BR-A3BF0F1	26537.7843	30.4823	166.0279	26537.7403	30.4825	165.9449	-0.0441	0.0002	-0.0830	0.1345					
BR-A3BF0F2	26715.7603	30.4209	166.0038	26715.7396	30.4212	165.9364	-0.0298	0.0003	-0.0674	0.1390					
BR-A3BF0F4	26572.7839	28.0095	166.0316	26572.8051	28.0095	166.0769	0.0212	0.0000	0.0473	0.0824					
BR-A3BF0F5	26363.7700	28.0513	166.0315	26363.7750	28.0513	166.0560	0.0050	-0.0000	0.0245	0.0252					
BR-A3BPM7F1	26685.8146	31.2949	179.0190	26685.8948	31.2949	179.8210	-0.1422	0.0013	0.6089	0.7527					
BR-A3BPM7F2	26687.8858	31.1068	171.0130	26687.8900	31.1078	171.8289	-0.0988	0.0012	0.1516	0.2727					
BR-A3CY3F1	26916.8928	34.9902	150.1120	26916.8908	34.9904	150.1441	-0.0020	0.0002	0.0321	0.0928					
BR-A3CY3F2	26751.8700	35.0119	150.0030	26751.8090	35.0118	150.0372	-0.0610	-0.0001	0.0342	0.0770					
BR-A3CY3F3	26966.7969	34.9843	97.8570	26966.7881	34.9846	98.0436	-0.0088	0.0003	0.0886	0.1431					
BR-A3CY3F4	26968.7699	34.9842	-97.8920	26968.8484	34.9843	-97.8969	0.1768	0.0001	-0.0046	0.1837					
BR-A3BD07F1	26252.3307	26.8494	180.0360	26252.3273	26.8494	180.0152	-0.0034	-0.0000	-0.0228	0.0249					
BR-A3BD07F2	26547.8694	26.8229	180.0167	26547.8694	26.8229	180.0167	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
BR-A3BD07F3	26335.0778	25.2919	180.0808	26335.0717	25.2919	180.0927	-0.0081	-0.0001	0.0847	0.0950					
BR-A3BD07F4	26359.4482	23.9583	180.0080	26359.3586	23.9583	180.1711	-0.0878	-0.0001	0.1651	0.1883					
BR-A3BD07F5	26062.4837	24.0651	180.0240	26062.3953	24.0650	180.1424	-0.0884	-0.0000	0.1184	0.1491					
BR-A3BF7F1	24975.0687	22.3827	165.9650	24975.0822	22.3827	166.0284	0.0135	0.0000	0.0634	0.0658					
BR-A3BF7F2	25151.0282	22.2949	166.0030	25151.0481	22.2949	166.0361	0.0199	0.0001	0.0331	0.0482					
BR-A3BF7F3	24950.8338	21.1122	166.0150	24950.8802	21.1122	166.2236	0.0484	-0.0000	0.0728	0.0894					
BR-A3BF7F4	24950.8338	21.1122	166.0093	24942.1849	21.1122	166.1020	-0.0698	-0.0018	0.0385	0.0520					
BR-A3BF7F5	24764.6850	19.0187	168.0540	24764.6900	19.0188	168.0266	0.0048	-0.0001	0.0072	0.0405					
BR-A3BPM7F1	26165.3902	23.5027	171.0130	26165.4074	23.5028	171.4983	0.0082	0.0001	0.4833	0.4862					
BR-A3BPM7F2	26163.4697	23.4634	171.0130	26163.5234	23.4635	171.4529	0.0537	0.0001	0.4399	0.4450					
BR-A3CY3F1	26522.0238	27.1380	124.0120	26522.0530	27.1359	124.0134	0.0294	-0.0001	0.0104	0.0494					
BR-A3CY3F2	26527.9880	27.1903	124.0170	26527.9552	27.1903	124.1252	-0.0527	-0.0000	0.1062	0.1124					
BR-A3CY3F3	26573.7831	27.1216	73.8910	26573.8598	27.1213	73.8659	0.0737	-0.0004	-0.0171	0.1778					
BR-A3CY3F4	26573.8736	27.1224	73.8560	26573.8736	27.1206	73.8266	-0.0237	-0.0000	0.0207	0.0317					
BR-A3SF2F1	24628.0549	23.1520	159.0467	24628.0549	23.1520	159.0467	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
BR-A3SF2F2	24693.2114	23.2463	79.8908	24693.2037	23.2460	79.7327	-0.0077	-0.0003	0.0416	0.1365					
BR-A3SF2F5	26282.8709	23.1198	79.8782	26282.9300	23.1198	79.7029	0.0591	0.0002	0.0247	0.1090					
BR-A3BD08F1	24366.7772	14.8301	180.0639	24366.7374	14.8302	180.0787	-0.0398	0.0001	0.0148	0.0497					
BR-A3BD08F2	24651.7473	14.7015	180.0772	24651.7604	14.7015	180.0698	0.0131	0.0001	-0.0073	0.0309					
BR-A3BD08F3	24441.5184	13.4245	180.0330	24441.5441	13.4246	179.8778	0.0277	0.0001	-0.0553	0.0722					
BR-A3BD08F4	24458.3233	12.0528	179.9871	24458.3218	12.0528	179.8548	-0.0015	0.0001	-0.0125	0.0258					
BR-A3BD08F5	24170.9855	12.1468	179.9248	24171.0140	12.1468	179.9057	0.0295	0.0000	-0.0191	0.0388					
BR-A3CY4F1	24638.0188	15.8383	150.1371	24638.0477	15.8383	150.1421	0.0289	-0.0001	0.0050	0.0455					
BR-A3CY4F2	24474.3393	15.8873	150.0099	24474.3502	15.8871	149.9975	0.0109	-0.0002	-0.0124	0.0387					
BR-A3CY4F3	24687.8694	15.8217	98.0971	24687.7281	15.8216	98.0547	0.0387	-0.0001	-0.0424	0.0778					
BR-A3CY4F4	24687.7078	15.8227	-97.9959	24687.7480	15.8224	-98.0234	0.0402	-0.0002	-0.0275	0.1118					
BR-A3QD2F1	24650.9043	18.8998	230.1957	24650.8920	18.8998	230.1936	-0.0523	0.0000	-0.0021	0.0525					
BR-A3QD2F2	24693.1780	19.2247	230.1407	24693.1623	19.2246	230.1733	0.0142	-0.0001	0.0328	0.0518					
BR-A3QD2F3	24879.8942	19.1422	229.9611	24879.8943	19.1421	229.9618	-0.0400	-0.0001	0.0089	0.0943					
BR-A3QD2F4	24837.9181	18.8210	229.9798	24837.8741	18.8209	230.0010	-0.0450	-0.0001	0.0212	0.0687					
BR-A3QD2F5	24504.7028	16.6108	230.1519	24504.6473	16.6108	230.1277	-0.0552	0.0000	-0.0242	0.1013					
BR-A3QD2F6	24538.4280	17.1424	230.1064	24538.3820	17.1424	230.0725	-0.0680	0.0000	-0.0339	0.0755					
BR-A3QD2F7	24726.2952	17.0782	229.9610	24726.2254	17.0783	229.9374	-0.0698	0.0001	-0.0238	0.0801					
BR-A3QD2F8	24692.7845	16.5476	230.0093	24692.7581	16.5477	229.9899	-0.0264	0.0001	-0.0223	0.0450					
BR-A3QF2F1	24074.4053	10.3981	230.0591	24074.4383	10.3982	230.0382	0.0330	0.0000	-0.0199	0.0391					
BR-A3QF2F2	24115.8845	10.9356	230.0285	24117.0442	10.9350	230.0200	0.0097	-0.0000	-0.0085	0.0428					
BR-A3QF2F3	24263.6047	10.8507	230.1360	24263.6737	10.8508	230.1154	0.0600	-0.0001	-0.0169	0.0507					
BR-A3QF2F4	24281.3930	10.3172	230.1705	24281.4182	10.3171	230.1507	0.0251	-0.0001	-0.0198	0.0429					
BR-C8BPM1F1	24084.8046	9.2127	171.0130	24083.8482	9.2126	173.4809	-1.0164	-0.0001	2.4679	2.6962					
BR-C8BPM1F2	24075.6469	9.0766	171.0130	24074.7644	9.0758	173.4288	-0.8824	-0.0006	2.4168	2.8860					
BR-C8CX1F1	24037.3533	9.8430	132.5350	24037.3343	9.8431	132.4956	-0.0209	0.0001	-0.0394	0.0704					
BR-C8CX1F2	24230.2809	9.8823	132.8540	24230.2155	9.8822	132.5191	-0.0684	-0.0001	-0.0349	0.0529					
BR-C8CX1F3	24281.5321	9.8408	82.3010	24281.5222	9.8408	82.2190	-0.0099	0.0000	-0.0850	0.0883					
BR-C8CX1F4	24283.6047	10.8507	230.1360	24283.6737	10.8508	230.1154	0.0600	-0.0001	-0.0169	0.0507					
BR-A4QF1F1	24117.3038	-10.9353	230.1147	24117.3085	-10.9354	230.1002	0.0047	-0.0001	-0.0146	0.0348					
BR-A4QF1F2	24074.6888	-10.3979	230.0909	24074.6511	-10.3979	230.0575	-0.0177	-0.0001	-0.0334	0.0438					
BR-A4QF1F3	24074.6515	-10.3168	229.9682	24074.6470	-10.3168	230.0059	-0.0045	0.0000	0.0007	0.0128					
BR-A4QF1F4	24303.8924	-10.8053	230.0015	24303.9115	-10.8053	230.0275	0.0160	-0.0000	0.0260	0.0308					
BR-C8BPM2F1	24075.7091	-9.0765	171.0130	24075.6374	-9.0742	172.0641	-0.0717	0.0023	1.1011	1.4220					
BR-C8BPM2F2	24084.8288	-9.2127	171.0130	24084.8930	-9.2108	172.1139	-0.0338	0.0019	1.1005	1.3657					
BR-C8CX2F1	24037.3153	-9.8428	132.5379	24037.2756	-9.8428	132.5751	-0.0403	-0.0002	0.0342	0.0903					
BR-C8CX2F2	24230.3682	-9.8627	132.8581	24230.3613	-9.8624	132.5477	-0.0070	0.0003	0.0116	0.1320					

Part 2: Deviations of All Elements

Name	Vector Group											
	CYU ANALYSIS: Auto Vectors: Groups: REFERENCE FINAL to FD ONLY											
	Begin			End			Delta					
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag		
BR-CSCX2F3	24281.6804	-9.8413	82.5121	24281.6967	-9.8413	82.5211	0.0153	0.0000	0.0090	0.0248		
BR-CSCX2F4	24281.6207	-9.8416	-82.3809	24281.6497	-9.8419	-82.4373	0.0231	-0.0003	-0.0563	0.1489		
BR-A4BD1F1	24171.0010	-12.1484	180.0066	24170.9992	-12.1483	179.9742	-0.0018	0.0001	-0.0324	0.0810		
BR-A4BD1F2	24468.2050	-12.0510	180.0254	24468.2570	-12.0509	180.0311	0.0485	0.0001	0.0057	0.0672		
BR-A4BD1F3	24441.5463	-13.4226	179.9819	24441.5574	-13.4226	179.9311	0.0091	0.0001	-0.0368	0.0424		
BR-A4BD1F4	24681.9244	-14.8097	179.9960	24681.9207	-14.8098	179.9968	-0.0334	-0.0001	0.0007	0.0538		
BR-A4BD1F5	24356.8706	-14.8287	179.9840	24356.8577	-14.8288	179.9771	-0.0219	-0.0001	-0.0069	0.0584		
BR-A4CY1F1	24638.1439	-15.8381	150.0021	24638.1274	-15.8380	150.0055	-0.0165	0.0001	0.0034	0.0376		
BR-A4CY1F2	24474.8233	-15.8877	150.0750	24474.8005	-15.8878	150.0819	-0.0228	-0.0001	0.0069	0.0466		
BR-A4CY1F3	24687.7136	-15.8232	97.8961	24687.7222	-15.8230	97.8883	0.0086	0.0002	-0.0078	0.0764		
BR-A4CY1F4	24687.6971	-15.8226	-98.0449	24687.7002	-15.8225	-98.0593	0.0382	0.0001	-0.0148	0.0792		
BR-A4CD1F1	24693.0505	-18.2247	230.1174	24692.9950	-18.2246	230.1073	-0.0346	0.0001	-0.0101	0.0878		
BR-A4CD1F2	24692.8638	-18.8998	230.0580	24692.8374	-18.8998	230.0526	0.0246	0.0001	0.0065	0.0492		
BR-A4CD1F3	24837.8588	-18.6212	229.9454	24837.8508	-18.6212	229.9342	0.0342	-0.0001	-0.0211	0.0408		
BR-A4QD1F4	24879.7292	-19.1424	229.9852	24879.6852	-19.1426	229.9808	-0.0440	-0.0001	-0.0243	0.0656		
BR-A4QG1F1	24538.9601	-17.1419	230.2888	24538.9507	-17.1419	230.2918	-0.0383	0.0000	0.0030	0.0384		
BR-A4QG1F2	24505.1572	-16.6105	230.2680	24505.0958	-16.6105	230.2681	-0.0575	0.0001	0.0001	0.0622		
BR-A4QG1F3	24693.2687	-16.5477	229.7939	24693.2104	-16.5478	229.7947	-0.0463	0.0001	0.0008	0.0529		
BR-A4QG1F4	24726.8266	-17.0752	229.8047	24726.7763	-17.0751	229.8036	-0.0503	0.0001	-0.0041	0.0516		
BR-A4BD2F1	25074.1704	-24.0603	180.1204	25074.1603	-24.0603	180.1204	0.0339	-0.0002	0.0274	0.0823		
BR-A4BD2F2	26359.1397	-23.9958	180.1280	26359.1497	-23.9951	180.1984	0.0101	-0.0003	0.0024	0.0443		
BR-A4BD2F3	26334.8559	-25.2868	180.1893	26334.8807	-25.2869	180.2301	0.0238	-0.0002	0.0408	0.1149		
BR-A4BD2F4	25547.0515	-26.5201	180.1707	25547.0934	-26.5203	180.1828	0.0419	-0.0003	0.0219	0.1287		
BR-A4BD2F5	26252.3350	-26.6464	180.1075	26252.3350	-26.6467	180.2044	0.0720	-0.0003	0.0089	0.1472		
BR-A4BF1F1	24704.6761	-19.9183	166.0270	24704.6629	-19.9182	166.0189	-0.0133	0.0001	-0.0081	0.0550		
BR-A4BF1F2	24942.0748	-19.8473	166.0174	24942.0709	-19.8472	166.0259	-0.0037	0.0001	0.0085	0.0478		
BR-A4BF1F3	24949.6360	-21.1119	166.0360	24949.6360	-21.1119	166.0360	0.0000	0.0001	0.0000	0.0581		
BR-A4BF1F4	25151.0338	-23.2948	166.0093	25151.1154	-23.2947	166.0347	0.0385	0.0001	0.0025	0.0940		
BR-A4BF1F5	24975.1157	-22.3826	166.0097	24975.1833	-22.3824	166.0130	0.0677	0.0002	0.0033	0.1023		
BR-A4BF1F6	25153.4697	-23.4694	71.0130	25153.4228	-23.4635	70.8895	-0.0470	-0.0001	-0.1235	0.1378		
BR-A4BP1F1	25165.9602	-23.9627	71.0130	25165.9444	-23.9628	70.8279	-0.0549	-0.0001	-0.1851	0.2003		
BR-ACX1F1	25327.8515	-27.1910	124.0880	25327.9172	-27.1909	124.1238	-0.0343	0.0001	0.0348	0.0561		
BR-ACX1F2	25822.4390	-27.1364	124.0790	25822.4196	-27.1363	124.1069	-0.0252	0.0001	0.0309	0.0485		
BR-ACX1F3	25712.9200	-27.1220	73.8440	25712.9200	-27.1220	73.8440	0.0000	0.0001	0.0000	0.0581		
BR-ACX1F4	25974.9719	-34.3851	74.2800	25973.9536	-34.3852	74.2330	0.0150	0.0001	0.0270	0.0946		
BR-A4SF1F1	25123.6802	-33.1527	166.0208	25127.8688	-33.1528	168.9738	-0.0104	0.0001	-0.0472	0.0589		
BR-A4SF1F2	26297.1237	-33.1210	-79.4368	26293.3244	-33.1211	-79.4049	0.2007	-0.0001	0.0915	0.2100		
BR-A4SF1F3	26283.0222	-33.1195	79.3379	26283.0846	-33.1194	79.3892	0.0624	0.0000	0.0313	0.0721		
BR-A4BD3F1	25562.8251	-31.9064	180.0595	25562.8525	-31.9066	180.1177	-0.1726	-0.0002	0.0582	0.2120		
BR-A4BD3F2	25861.9176	-31.8582	180.0285	25861.9366	-31.8581	179.9948	-0.0190	0.0002	-0.0317	0.0777		
BR-A4BD3F3	25799.2561	-33.1508	180.0847	25799.1912	-33.1508	180.0737	-0.0649	-0.0001	-0.0089	0.0850		
BR-A4BD3F4	25974.9719	-34.3851	180.0498	25974.9276	-34.3852	180.0707	0.0640	-0.0001	0.0211	0.0784		
BR-A4BD3F5	25677.1784	-34.4688	179.9951	25677.0908	-34.4688	179.9820	-0.0858	-0.0001	-0.0131	0.0911		
BR-A4BF2F1	25393.7818	-28.0511	166.0281	25393.8021	-28.0518	166.0347	0.0202	-0.0001	-0.0015	0.0496		
BR-A4BF2F2	25572.0935	-28.0009	166.0376	25572.0985	-28.0017	166.0446	0.0049	-0.0002	0.0070	0.0736		
BR-A4BF2F3	25557.8234	-28.2414	166.0765	25557.7417	-28.2415	166.0343	-0.0817	-0.0001	-0.0243	0.1089		
BR-A4BF2F4	25715.6728	-30.4213	166.0408	25715.6107	-30.4215	166.0085	-0.0621	-0.0002	-0.0343	0.1248		
BR-A4BF2F5	25537.7034	-30.4828	166.0707	25537.6381	-30.4828	166.0178	-0.0673	-0.0002	-0.0532	0.1185		
BR-A4BP2F1	25657.9885	-31.1068	71.0130	25657.7648	-31.1061	71.5739	0.0764	-0.0024	0.5006	1.2288		
BR-A4CY2F1	25965.6148	-31.2349	71.0130	25965.5429	-31.2372	71.5473	-0.0718	-0.0023	0.5343	1.1733		
BR-A4CY2F2	25916.9208	-34.9909	150.1070	25916.9427	-34.9908	150.1089	0.0222	0.0001	-0.0011	0.0802		
BR-A4CY2F3	26752.0226	-35.0126	150.1100	26752.0712	-35.0127	150.1029	0.0487	-0.0000	-0.0071	0.0522		
BR-A4CY2F4	25968.8143	-34.9845	97.9820	25968.8459	-34.9847	97.9780	0.0315	-0.0001	-0.0040	0.0703		
BR-A4CY2F5	25968.8238	-34.9847	-97.9590	25968.8372	-34.9858	-97.9997	0.0134	-0.0011	-0.0407	0.4977		
BR-A4BD4F1	25839.4406	-36.9210	180.0220	25839.4362	-36.9210	179.8852	-0.0014	0.0000	-0.1368	0.1368		
BR-A4BD4F2	29139.4511	-36.9122	180.0390	29139.4570	-36.9121	179.9130	0.0059	0.0001	-0.2920	0.1089		
BR-A4BD4F3	26039.0408	-41.1503	180.0350	26039.0336	-41.1508	180.0268	0.0066	-0.0001	0.0016	0.0810		
BR-A4BD4F4	26179.7682	-42.4208	180.0220	26179.8017	-42.4207	180.0278	0.0335	-0.0001	0.0058	0.0810		
BR-A4BD4F5	25880.2804	-42.4676	180.0220	25880.3275	-42.4677	180.0168	0.0411	-0.0001	-0.0052	0.0401		
BR-A4BF3F1	26777.0506	-35.8687	166.0280	26777.0588	-35.8686	166.0233	0.0083	0.0001	-0.0047	0.0547		
BR-A4BF3F2	26956.8777	-35.8512	166.0040	26956.9238	-35.8512	166.0170	0.0481	0.0001	0.0130	0.0583		
BR-A4BF3F3	25905.1778	-37.0638	166.0930	25905.1568	-37.0638	165.9374	-0.0213	0.0001	-0.0858	0.0840		
BR-A4BF3F4	26027.2061	-38.2491	166.0280	26027.1890	-38.2490	165.9744	-0.0378	0.0000	-0.0538	0.0659		
BR-A4BF3F5	26039.0408	-41.1503	180.0350	26039.0336	-41.1508	180.0268	0.0066	-0.0001	0.0016	0.0810		
BR-A4BP3F1	25964.0481	-36.3710	71.0130	25964.1224	-36.3738	71.4244	0.0743	-0.0027	0.4114	1.3133		
BR-A4BP3F2	25968.5878	-36.4968	71.0130	25968.6572	-36.5013	71.4169	0.0994	-0.0027	0.4038	1.2981		
BR-A4SD1F1	26054.7765	-39.0077	158.9533	26054.8033	-39.0078	158.9344	0.0288	-0.0000	-0.0189	0.0334		
BR-A4SD1F2	25817.2520	-39.1191	79.1632	25817.2777	-39.1192	79.2035	0.0257	-0.0001	0.0103	0.0834		
BR-A4SD1F3	26062.2231	-39.0763	79.5085	26062.3226	-39.0759	79.4102	0.0980	0.0003	-0.0993	0.2086		
BR-A4BF4F1	25936.4670	-43.7962	166.0349	25936.4957	-43.7962	166.0546	-0.0362	0.0001	0.0191	0.0364		
BR-A4BF4F2	26119.4032	-43.8376	166.0327	26119.4307	-43.8376	166.0360	0.0275	0.0001	0.0016	0.0810		
BR-A4BF4F3	26032.2710	-46.0203	166.0863	26032.2866	-46.0203	166.0444	0.0182	0.0001	-0.0230	0.0424		

Part 2: Deviations of All Elements

Vector Group												
CVU ANALYSIS: Auto Vectors, Groups: REFERENCE.FINAL to FID ONLY												
Name	Begin			End			Delta					
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag		
BR-A4BF4F4	26119.4173	-46.1967	166.0320	26119.4055	-46.1968	166.0575	-0.0118	-0.0001	0.0246	0.0650		
BR-A4BF4F5	25939.4500	-46.2070	166.0595	25939.4670	-46.2070	166.0526	0.0103	0.0000	-0.0069	0.0215		
BR-A4BD0F1	25879.6852	-47.5375	180.0202	25879.6707	-47.5375	180.0230	-0.0145	0.0000	0.0028	0.0180		
BR-A4BD0F2	26179.8650	-47.5750	179.9871	26179.8526	-47.5750	179.9763	-0.0054	0.0000	-0.0068	0.0190		
BR-A4BD0F3	26040.2376	-48.5240	190.0789	26040.2656	-48.5240	190.0626	0.0162	-0.0000	0.0025	0.0257		
BR-A4BD0F4	26139.8117	-50.0025	180.0285	26139.8728	-50.0026	179.9907	0.0611	-0.0001	-0.0358	0.0773		
BR-A4BD0F5	25839.8539	-50.0540	180.0128	25839.8978	-50.0542	179.9890	0.0439	-0.0001	-0.0238	0.0685		
BR-A4BF5F1	25846.4441	-51.7236	166.0760	25846.4269	-51.7236	165.9671	-0.0172	-0.0000	-0.1089	0.1122		
BR-A4BF5F2	26027.8689	-51.7576	166.0210	26027.8713	-51.7577	165.9254	0.0024	-0.0000	-0.0956	0.0967		
BR-A4BF5F3	25905.7040	-52.0433	166.0027	25905.7187	-52.0433	165.9173	0.0128	-0.0000	-0.0854	0.0882		
BR-A4BF5F4	25957.4783	-54.1556	165.9702	25957.5058	-54.1556	165.9519	0.0275	-0.0001	-0.0183	0.0805		
BR-A4BF5F5	25777.5065	-54.1361	165.9720	25777.5094	-54.1361	165.9467	-0.0010	-0.0000	-0.0263	0.0269		
BR-A4BPM4F1	25958.8436	-52.5079	71.0130	25958.7812	-52.5072	71.0164	-0.0022	0.0007	-0.0034	0.0044		
BR-A4BPM4F2	25954.3403	-50.8355	71.0130	25954.2978	-50.8347	71.0065	-0.0425	0.0007	0.0085	0.0560		
BR-A4SD2F1	25954.8680	-50.9127	159.0100	25954.8045	-50.9125	159.0107	-0.0635	0.0002	0.0097	0.0685		
BR-A4SD2F4	26092.4975	-50.9347	-79.4720	26092.4008	-50.9344	-79.4943	-0.0967	0.0003	-0.0223	0.1785		
BR-A4SD2F5	26092.3008	-50.9352	79.4190	26092.2624	-50.9350	79.4074	-0.0784	0.0002	-0.0116	0.1200		
BR-A4BD0F1	25977.8927	-55.5378	180.0438	25977.7359	-55.5377	179.9852	0.0462	0.0001	-0.0559	0.0911		
BR-A4BD0F2	25975.4854	-55.6177	179.9985	25975.5281	-55.6175	179.9359	0.0427	0.0002	-0.0528	0.1228		
BR-A4BD0F3	25983.3252	-58.1481	180.0368	25983.3626	-58.1481	180.0000	0.0460	0.0001	-0.0029	0.0654		
BR-A4BD0F4	25983.3252	-58.1481	180.0368	25983.3626	-58.1480	179.9682	0.0344	0.0000	-0.0508	0.0950		
BR-A4BD0F5	25584.1532	-58.0073	180.0567	25584.1506	-58.0071	180.0112	0.0054	0.0001	-0.0445	0.0713		
BR-A4BF0F1	25538.4162	-59.5239	166.0680	25538.4359	-59.5239	166.0027	0.0196	0.0000	-0.0653	0.0708		
BR-A4BF0F2	25716.3583	-59.5851	166.0650	25716.3667	-59.5851	166.0073	0.0084	0.0000	-0.0577	0.0622		
BR-A4BF0F3	25558.5967	-60.7650	166.0430	25558.5887	-60.7650	165.9928	0.0040	-0.0000	-0.0502	0.0510		
BR-A4BF0F4	25573.7657	-61.9994	165.9510	25573.7436	-61.9995	166.0005	-0.0251	-0.0001	0.0195	0.0583		
BR-A4BF0F5	25538.4162	-61.9545	165.9550	25538.4359	-61.9550	165.9600	-0.0161	0.0000	-0.0265	0.0269		
BR-A4BPM5F1	25958.2332	-58.7715	71.0130	25958.6324	-58.7715	71.0080	0.1158	0.0001	0.0752	0.1426		
BR-A4BPM5F2	25958.4034	-58.8969	71.0130	25958.4521	-58.8967	71.0380	0.0480	0.0001	0.0260	0.0654		
BR-A4CY3F1	25917.3951	-55.0162	150.0870	25917.4182	-55.0164	150.0459	0.0231	-0.0002	-0.0411	0.0938		
BR-A4CY3F2	25922.4342	-54.9948	150.0870	25922.4241	-54.9948	150.0512	0.0560	-0.0000	-0.0358	0.0676		
BR-A4CY3F3	25967.3008	-55.0220	98.0910	25967.3244	-55.0221	98.0368	0.0236	-0.0001	-0.0522	0.0778		
BR-A4CY3F4	25967.3237	-55.0221	97.8000	25967.3060	-55.0220	97.8410	0.0729	0.0002	0.0080	0.0997		
BR-A4BD0F1	25523.0176	-63.2587	180.0050	25523.0496	-63.2586	179.9514	0.0262	0.0001	-0.0539	0.0701		
BR-A4BD0F2	25523.0176	-63.2587	180.0050	25523.0496	-63.2587	179.9950	0.0000	0.0001	-0.0380	0.0661		
BR-A4BD0F3	25335.6716	-64.7151	179.9620	25335.6991	-64.7150	179.9415	0.0275	0.0001	-0.0205	0.0643		
BR-A4BD0F4	25390.4407	-66.0387	179.9970	25390.4420	-66.0387	180.0026	0.0013	0.0000	0.0058	0.0168		
BR-A4BD0F5	25063.3307	-65.8420	179.9920	25063.3185	-65.8419	179.9990	-0.0130	0.0001	0.0070	0.0514		
BR-A4BF7F1	24976.3206	-67.8235	166.0459	24976.2774	-67.8235	165.9852	-0.0432	0.0000	-0.0607	0.0772		
BR-A4BF7F2	25152.2639	-67.7114	166.0682	25152.2631	-67.7113	165.9855	-0.0008	0.0001	-0.0827	0.0910		
BR-A4BF7F3	24952.1625	-68.8943	166.0702	24952.1556	-68.8942	166.0012	-0.0039	0.0001	-0.0690	0.0729		
BR-A4BF7F4	24943.2934	-70.1557	165.9920	24943.2924	-70.1556	165.9584	-0.0109	-0.0001	-0.0338	0.0535		
BR-A4BF7F5	24785.6204	-70.0878	165.9647	24785.6072	-70.0878	165.9371	-0.0132	-0.0000	-0.0278	0.0300		
BR-A4BPM6F1	25166.4859	-66.4136	71.0130	25166.4554	-66.4122	71.0237	-0.0305	0.0014	0.0107	0.8934		
BR-A4BPM6F2	25154.5627	-66.5429	71.0130	25154.6039	-66.5411	71.0628	0.0412	0.0018	0.0498	0.9690		
BR-A4CX2F1	25523.5307	-62.8705	124.0680	25523.0881	-62.8702	124.1344	0.0125	0.0003	0.0084	0.1403		
BR-A4CX2F2	25523.5307	-62.8157	124.0260	25523.4911	-62.8157	124.0550	-0.0395	-0.0000	0.0020	0.0479		
BR-A4CX2F3	25574.7629	-62.8938	74.2310	25574.6443	-62.8934	74.3863	-0.1498	0.0002	0.1373	0.2190		
BR-A4CX2F4	25574.7480	-62.8938	74.2890	25574.7036	-62.8936	74.1707	-0.0444	0.0002	0.0863	0.1414		
BR-A4SF2F1	25126.9250	-66.8238	159.0210	25126.9200	-66.8234	159.0163	0.0764	0.0004	-0.0057	0.2110		
BR-A4SF2F2	26294.1421	-66.8880	-79.5340	26294.1070	-66.8885	-79.6182	-0.0351	0.0005	-0.0842	0.2249		
BR-A4SF2F3	26294.1500	-66.8856	79.4700	26294.1689	-66.8853	79.4328	0.0369	0.0004	-0.0372	0.1741		
BR-A4BD0F1	24358.3105	-75.1759	180.0100	24358.3027	-75.1760	180.0385	-0.0078	-0.0001	0.0265	0.0485		
BR-A4BD0F2	24653.4184	-75.3044	180.0020	24653.4249	-75.3044	180.0607	0.0065	-0.0000	0.0047	0.0229		
BR-A4BD0F3	24443.2358	-76.5516	180.0070	24443.2368	-76.5517	179.9951	0.0010	-0.0001	-0.0136	0.0544		
BR-A4BD0F4	24470.0752	-77.9551	180.0070	24470.0193	-77.9553	179.9772	-0.0370	-0.0002	-0.0068	0.1045		
BR-A4BD0F5	24172.7315	-77.5851	180.0080	24172.6932	-77.5853	180.0064	-0.0085	-0.0000	-0.0374	0.0566		
BR-A4BPM7F1	24532.8648	-74.8041	71.0130	24532.7181	-74.8032	71.2869	0.0333	0.0009	0.2730	0.4504		
BR-A4BPM7F2	24525.8599	-74.7365	71.0130	24525.8803	-74.7376	71.2959	0.0214	0.0009	0.2826	0.4991		
BR-A4CX3F1	24590.8396	-72.0821	124.0220	24590.8311	-72.0819	124.0643	-0.0085	0.0003	0.0423	0.1185		
BR-A4CX3F2	24784.1468	-72.1570	124.0480	24784.1993	-72.1569	124.0737	0.0524	0.0001	0.0277	0.0765		
BR-A4CX3F3	24935.3453	-72.1769	74.3210	24935.3659	-72.1767	74.3739	0.0206	0.0002	0.0529	0.0994		
BR-A4CX3F4	24835.3549	-72.1768	-74.4330	24835.4095	-72.1766	-74.3862	0.0549	0.0002	0.0438	0.1260		
BR-A4CY4F1	24639.6966	-74.5661	180.0480	24639.6966	-74.5661	180.0480	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		
BR-A4CY4F2	24475.8328	-74.1182	150.0400	24475.7792	-74.1182	149.9948	-0.0638	-0.0000	-0.0454	0.0705		
BR-A4CY4F3	24689.1549	-74.1832	97.9500	24689.1596	-74.1830	98.0203	0.0048	0.0002	0.0703	0.1261		
BR-A4CY4F4	24689.1694	-74.1828	-98.1040	24689.2687	-74.1827	-98.0018	0.0703	-0.0000	0.1022	0.1421		
BR-A4QD2F1	24652.1165	-71.3000	230.1577	24652.1547	-71.3000	230.1605	0.0382	0.0001	0.0028	0.0468		
BR-A4QD2F2	24694.3213	-70.7811	230.1125	24694.4036	-70.7809	230.0952	0.0623	0.0001	-0.0173	0.1013		
BR-A4QD2F3	24850.9749	-70.8654	229.9693	24850.9300	-70.8653	229.9752	0.0551	0.0000	0.0096	0.0596		
BR-A4QD2F4	24839.0972	-71.3846	230.0181	24839.1225	-71.3845	230.0465	0.0254	0.0000	0.0274	0.0676		
BR-A4QD2F5	24825.6033	-73.3951	230.0486	24825.6970	-73.3950	230.0402	-0.0063	0.0001	-0.0084	0.0394		

Part 2: Deviations of All Elements

Vector Group										
CYU ANALYSIS - Auto Vectors, Groups, REFERENCE FINAL to FID ONLY										
Name	Begin			End			Delta			
	R1	Theta1	Z1	R2	Theta2	Z2	dR	dTheta	dZ	Mag
BR-AAQ2F2	24539.7338	-72.8635	229.9699	24539.7004	-72.8635	229.9532	-0.0242	0.0001	-0.0367	0.0524
BR-AAQ2F3	24727.5715	-72.9304	230.0141	24727.5855	-72.9303	229.9750	0.0140	0.0001	-0.0391	0.0535
BR-AAQ2F4	24693.9755	-73.4580	230.0599	24693.9700	-73.4579	230.0406	0.0005	0.0001	-0.0193	0.0582
BR-AAQ2F3	24309.0509	-79.1508	239.9850	24309.0525	-79.1507	239.9717	0.0117	-0.0001	-0.0133	0.0522
BR-ISCXW1F1	24039.2838	-80.0500	132.6320	24032.1198	-80.0500	132.4634	-0.0442	-0.0000	-0.0410	0.0660
BR-ISCXW1F2	24232.2869	-80.1366	132.6660	24232.2464	-80.1364	132.6228	-0.0386	0.0002	-0.0422	0.1038
BR-ISCXW1F3	24283.5915	-80.1607	82.4530	24283.5668	-80.1606	82.4163	-0.0247	0.0001	-0.0367	0.0821
BR-ISCXW1F4	24283.5662	-80.1610	-82.3710	24283.5552	-80.1610	-82.4045	-0.0080	-0.0000	-0.0335	0.0373
BR-ISKIC1F1	24238.2383	-80.4843	-86.0000	24238.2150	-80.4843	-86.0368	-0.0233	-0.0001	-0.0368	0.0503
BR-ISKIC1F2	24165.7654	-81.5165	-86.0000	24165.7056	-81.5166	-86.0095	-0.0597	-0.0001	-0.0095	0.0651
BR-ISKIC1F3	23918.8292	-81.4282	-86.0000	23918.8493	-81.4285	-86.0212	-0.0399	-0.0003	-0.0212	0.1216
BR-ISKIC1F4	23889.7294	-80.3654	-86.0000	23889.6505	-80.3655	-86.0262	-0.0478	-0.0001	-0.0262	0.0515
BR-ISKIC2F1	23975.6845	-85.4787	-86.0000	23975.6315	-85.4787	-85.9885	-0.0330	0.0000	0.0116	0.0357
BR-ISKIC2F2	23944.6941	-86.5522	-86.0000	23944.6719	-86.5523	-86.0321	-0.0222	-0.0001	-0.0321	0.0515
BR-ISKIC2F3	23965.1513	-86.5159	-86.0000	23965.1106	-86.5159	-86.0227	-0.0407	-0.0000	-0.0227	0.0510
BR-ISKIC2F4	23726.7507	-85.4312	-86.0000	23726.6993	-85.4312	-85.9989	-0.0544	-0.0000	-0.0011	0.0550
BR-ISPKU1F1	23980.0628	-82.5255	71.0000	23980.0563	-82.5279	71.0054	-0.0065	-0.0014	0.0054	0.6784
BR-ISPKU1F2	23972.5878	-82.6389	71.0000	23972.7009	-82.6583	70.9850	0.1130	-0.0013	-0.0420	0.5712
BR-ISMP1F1	23876.5629	-69.7611	124.6320	23876.5523	-69.7610	124.6185	-0.0003	0.0001	-0.0135	0.0514
BR-ISMP1F2	23876.5629	-69.7611	124.6320	23876.5523	-69.7611	124.6301	-0.0074	0.0000	-0.0022	0.0415
BR-ISMP1F3	23778.4405	-90.7718	124.8911	23778.4342	-90.7718	124.8787	-0.0063	0.0001	-0.0124	0.0287
BR-ISMP1F4	23778.4534	-89.7601	124.8820	23778.4394	-89.7601	124.8577	-0.0240	0.0000	-0.0243	0.0358
BR-A1QF1F1	24119.2378	-100.6341	230.0942	24119.2093	-100.6344	230.0323	-0.0605	-0.0003	-0.0619	0.1422
BR-A1QF1F2	24076.5697	-100.3969	230.0564	24076.6123	-100.3971	229.9981	0.0425	-0.0002	-0.0583	0.1095
BR-A1QF1F3	24263.5042	-100.3155	230.0517	24263.5446	-100.3158	230.0293	0.0404	-0.0002	-0.0224	0.1082
BR-A1QF1F4	24306.8222	-100.8489	230.0909	24306.8573	-100.8462	230.0518	0.0351	-0.0002	-0.0391	0.1153
BR-ISCXW2F1	24039.2396	-89.8403	132.6440	24039.2097	-89.8410	132.6154	-0.0227	-0.0007	-0.0714	0.1584
BR-ISCXW2F2	24232.4810	-89.8610	132.6530	24232.5033	-89.8612	132.6440	0.0220	-0.0003	0.0610	0.1569
BR-ISCXW2F3	24283.6206	-89.8403	82.2870	24283.6541	-89.8407	82.3585	0.0335	-0.0005	0.0715	0.2133
BR-ISCXW2F4	24283.6821	-89.8410	-82.4670	24283.7326	-89.8413	-82.4183	0.0505	-0.0003	0.0487	0.1541
BR-ISKIC3F1	23954.2334	-83.4460	-85.9845	23954.1920	-83.4466	-85.9702	-0.0414	-0.0000	0.0143	0.2579
BR-ISKIC3F2	23985.4510	-84.5195	-86.0000	23985.5003	-84.5192	-85.9985	0.1092	0.0002	0.0015	0.1393
BR-ISKIC3F3	23736.2029	-84.5671	-86.0000	23736.2506	-84.5667	-86.0708	0.1748	0.0004	0.0264	0.2129
BR-ISKIC3F4	23704.6356	-83.4827	-86.0000	23704.6041	-83.4829	-85.9636	-0.0315	-0.0002	0.0354	0.1056
BR-ISKIC4F1	24165.7302	-86.4634	-86.0000	24165.8404	-86.4633	-86.0285	0.1042	0.0000	-0.0205	0.1075
BR-ISKIC4F2	24238.2625	-89.6348	-86.1864	24238.2811	-89.6347	-86.1502	0.0368	0.0001	0.0361	0.0949
BR-ISKIC4F3	23989.7189	-89.6347	-86.0000	23989.7467	-89.6347	-86.0454	0.0278	-0.0001	-0.0454	0.0575
BR-ISKIC4F4	23918.5543	-86.5717	-86.0000	23918.5195	-86.5719	-86.0021	-0.0349	-0.0003	-0.0021	0.1162
BR-ISPKU2F1	23972.6999	-97.3374	71.0000	23972.9510	-97.3368	71.0448	0.2512	-0.0024	0.0448	1.0315
BR-ISPKU2F2	23980.1762	-97.4749	71.0000	23980.2093	-97.4774	71.0090	0.0931	-0.0025	0.0090	0.9618
RFC-F2	23551.0621	6.5508	142.2623	23551.0543	6.5513	142.2579	-0.0078	0.0005	-0.0043	1.9016
RFC-F4	24151.9027	1.0869	139.8786	24151.9437	1.0877	139.9255	0.0110	0.0008	-0.0841	0.3408
RFC-F5	24150.3834	1.4213	294.5555	24150.3338	1.4221	294.4222	-0.0498	0.0008	-0.1332	0.3484
RFC-F6	24191.9050	1.8910	350.3790	24191.8497	1.8925	350.3224	-0.0563	0.0008	-0.0566	0.3527
RFC-F7	24299.2985	5.0638	350.4999	24299.2330	5.0646	350.5489	-0.0656	0.0008	0.0490	0.3590
RFC-F8	24282.8763	5.1424	262.4187	24282.8049	5.1432	262.4471	-0.0714	0.0009	0.0284	0.3691
RFC-F1	24301.7702	6.3434	133.1811	24301.7814	6.3442	133.1806	0.0112	0.0008	-0.0205	0.3291
CS DS VALVE US FACE CTR	24036.0051	-8.4634	0.0000	24036.7850	-8.4631	-0.0937	0.7900	0.0003	-0.0937	0.7941
CS PIPE CTR	23779.8119	-0.8568	0.0000	23775.3939	-0.8568	1.3118	-1.5181	-0.0001	1.3118	2.0084
CS PIPE MID CTR	23835.5819	-4.1110	0.0000	23837.7738	-4.1109	0.2247	2.1919	0.0004	0.2247	2.2090
CS US VALVE DS FACE CTR	23774.4647	0.2561	0.0000	23771.8073	0.2561	-0.7659	-2.6874	0.0000	-0.7659	2.8000
DS 1 CTR	23999.0381	-172.1519	0.0000	23997.8793	-172.1515	1.0280	-1.1598	0.0004	1.0280	1.5573
DS 2 CTR	23904.8427	-174.0084	0.0000	23905.5740	-174.0085	-0.7818	0.7313	-0.0002	-0.7818	1.0732
DS 3 CTR	23774.3397	-179.8458	0.0000	23775.5196	-179.8458	-1.3663	0.1700	-0.0000	-1.3663	1.8053
DS 4 CTR	23975.1631	-177.5773	0.0000	23975.8370	-177.5775	0.3829	0.6739	0.0002	0.3829	0.7600
DS 5 CTR	23969.9305	-172.1537	0.0000	23969.2179	-172.1538	0.5329	0.2819	0.0001	0.5329	0.6541

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	8
1.1 Общие сведения об ускорителях заряженных частиц.....	8
1.2 Сооружения для размещения ускорителей заряженных частиц и создание современных ускорительно-накопительных комплексов	12
1.3 Вопросы проектирования ускорительно- накопительных комплексов	14
1.4 Допуски на геометрические параметры магнитных систем ускорителей заряженных частиц	19
1.5 Геодезическое оборудование для юстировки магнитных элементов первых ускорителей	23
1.6 Геодезические работы при производстве и монтаже элементов структуры отечественных ускорительных комплексов.....	32
2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПОРНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЕТЕЙ УНК.....	37
2.1 Основные задачи специальных геодезических сетей УНК и их виды	37
2.2 Методика комплексного подхода к геодезическому обеспечению жизненного цикла УНК.....	54

3. ЛАЗЕРНЫЕ ТРЕКЕРЫ – ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЬНО- НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ	59
3.1 Лазерный трекер API Laser Tracker	59
3.2 Координатно-измерительная система фирмы Leica. Лазерный трекер АТ 403	61
3.3 Точность определения координат лазерным трекером (специфика использования на ускорителях)	62
3.4 Влияние продолжительности внутренней термостабилизации прибора на точность измерений ..	63
3.5 Исследование точности линейных измерений API Laser Tracker 3	67
3.6 Исследование работы внутреннего электронного уровня API Laser Tracker 3	74
3.7 Исследования точности по внутренней сходимости лазерных трекеров API RADIAN и Leica АТ 400-й серии.	79
3.8 Исследования точности измерений API Laser Tracker 3 на координатно-измерительной машине Contura G2	84
3.9 Алгоритм вычисления секторов измерений со станции лазерного трекера с учетом допусков	88
4. МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ УНК	97
4.1 Методика нахождения геометрической оси для паспортизации магнитных элементов комплекса ВЭПП-4м	97
4.2 Методика геодезического обеспечения при изготовлении дипольных магнитов для бустера NSLS-II	105

4.3 Геодезическое обеспечение измерений квадрупольных и секступольных линз для бустера NSLS-II	119
5. ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 4-го ПОКОЛЕНИЯ ESRF-EBS	125
5.1 Европейский источник СИ (European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)).....	125
5.2 Инженерно-геодезическое обеспечение стадий и способов монтажа физического оборудования ускорителей	142
6. ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ УСКОРИТЕЛЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ	145
6.1 Учет природы возникновения гармонических колебаний частиц УНК	145
6.2 Моделирование геодезических измерений программными продуктами Spatial Analyzer и PANDA	151
6.3 Проектирование специальной геодезической сети источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ	164
6.4 Реализация методики геодезического обеспечения для источника СИ четвертого поколения СКИФ.....	168
7. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА	173
7.1 Спектральное представление деформационных процессов несущих сооружений ускорителей заряженных частиц	175
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	180
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	183

<i>Приложение 1</i>	197
<i>Приложение 2</i>	198
<i>Приложение 3</i>	198
<i>Приложение 4. Результаты циклов (2001-2013) геодезических измерений высотной сети ВЭПП-4м...</i>	199
<i>Приложение 5. Результаты погрешностей углов и длин линий со станций лазерного трекера спроектированной сети с внесенными случайными погрешностями после уравнивания в программных продуктах SA и PANDA.</i>	202
<i>Приложение 6. Разница координат полученных после уравнивания в SA и PANDA от проектных</i>	203
<i>Приложение 7</i>	205
<i>Приложение 8</i>	206
<i>Приложение 9</i>	207
<i>Приложение 10. Результаты контрольного цикла геодезических измерений положения элементов бустера NSLS-II</i>	207

Монография

Мурзинцев П. П.,

Буренков Д. Б., Полянский А. В. , Сердаков Л. Е.

**ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
СТРОИТЕЛЬСТВА, ЭКСПЛУАТАЦИИ И МОНИТОРИНГА
УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Подготовлено к печати ООО Агентство «Сибпринт»

Подписано в печать 16.06.2021. Формат 60X84/16.

Бумага офсетная. Тираж 30 экз.

Усл. печ. л. 13,49. Уч.-изд. л. 9,23. Заказ 2021/0616

Отпечатано в типографии ООО Издательство «Сибпринт».

630099, г. Новосибирск, ул. М. Горького, 39.

Тел. +7 (383) 218-00-36, e-mail: izdat-nsk@list.ru.

www.ifb.ru