

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

На правах рукописи



Буренков Денис Борисович

Разработка методики геодезического контроля
изготовления и установки элементов
ускорительно-накопительных комплексов
с использованием API Laser Tracker 3

25.00.32 - Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
доцент
Мурзинцев Петр Павлович

Новосибирск 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ.....	10
1.1 Первые ускорительные комплексы	10
1.2 Требования к точности позиционирования элементов ускорительно- накопительных комплексов	12
1.3 Краткая характеристика комплекса ВЭПП-4м.....	13
1.4 Общие сведения об большом адронном коллайдере.....	15
1.5 Общие сведения о Брукхейвенской национальной лаборатории.....	18
1.6 Геодезическое оборудование для юстировки магнитных элементов первых ускорителей.....	21
1.7 Постановка задачи исследования	29
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ API LASER TRACKER 3.....	30
2.1 Сущность работы и краткая характеристика API Laser Tracker 3.....	30
2.2 Сравнительный анализ мобильных координатно-измерительных машин	32
2.3 Стандартные марки (отражатели) для лазерных трекеров	37
2.4 Экспериментальные исследования по влиянию прогрева API Laser Tracker 3 на точность геодезических измерений	39
2.5 Исследование точности линейных измерений.....	43
2.6 Исследование внутреннего электронного уровня	50
2.7 Разработка методики исследования точности измерений API Laser Tracker 3 на координатно-измерительной машине Contura G2.....	54
2.8 Разработка оснастки для работы с API Laser Tracker 3.....	59

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И УСТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЬНО- НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ	63
3.1 Разработка методики нахождения геометрической оси магнитного элемента. Паспортизация геодезических знаков на примере магнитных элементов комплекса ВЭПП-4м	63
3.2 Технологическая схема геодезического обеспечения при изготовлении дипольных магнитов для бустера NSLS-II	70
3.3 Геодезическое обеспечение измерений квадрупольных и секступольных линз для бустера NSLS-II	83
3.4 Назначение ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000	87
3.5 Разработка методики геодезического обеспечения периодической высокоточной юстировки магнитных элементов ВЭПП-2000.....	93
3.6 Расчет обобщенных временных затрат	98
4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ВНЕДРЕНИЕ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ	101
4.1 Алгоритм и программа для уравнивания плановой опорной сети комплекса ВЭПП-4м	101
4.2 Разработка алгоритма и программы обработки результатов геодезических измерений в опорной высотной сети ВЭПП-4м	109
4.3 Программа для уравнивания опорной сети макета ускорительного комплекса СГУГ и Т	113
4.4 Программы “Виртуальный полигон” и “Нивелирование по трассе”	116
4.6 Разработка алгоритма и программного продукта для построения 3-D моделей по геодезическим данным	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЪЕМКА УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ВЭПН-2000 25-29 ОКТЯБРЯ 2010 ГОДА.....	137
--	-----

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Физика элементарных частиц на современном этапе развития неотрывно связана с созданием новых и модернизацией действующих ускорительных комплексов. В мире существует и активно развиваются несколько десятков центров по изучению основ фундаментальной физики. Наиболее крупные из них: Европейский центр ядерных исследований (CERN), расположенный на территории Швейцарии и Франции. Брукхейвенская национальная лаборатория (BNL), Стенфордский центр линейных ускорителей (SLAC), национальная ускорительная лаборатория им. Энрико Ферми (Фермилаб) расположены на территории США. Национальная ускорительная лаборатория высоких энергий KEK, находящаяся в Японии. Немецкий электронный синхротрон (DESY), Германия. Лаборатория линейных ускорителей, расположена в небольшом итальянском городке Фраскати. Институт физики высоких энергий (ИФВЭ) и Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). Строительство и обслуживание таких центров требует огромных денежных затрат. Для примера, в проекте создания и работы большого адронного коллайдера (LHC), расположенного в CERN, приняло участие более 40 государств, объединенных в коллаборацию. Стоимость создания LHC оценивается около 4,5 миллиардов ЕВРО, без учета строительства тоннеля. Этот комплекс состоит из нескольких ускорителей линейных Linac2, Linac3 и кольцевых PS, SPS, LHC. Кольцо LHC имеет периметр 26,7 км и расположено на глубине от 50 до 175 м. На сегодняшний день это самый большой из действующих ускорительных комплексов.

Основу современных ускорительно-накопительных комплексов (УНК) заряженных частиц составляет уникальное физическое оборудование, объединяющее различные по форме магнитные элементы, от изготовления и высокоточной установки которых зависит эффективность работы всего УНК. Магнитные элементы могут быть успешно изготовлены только при высокоточном

геодезическом контроле, выполняющемся на всех этапах их производства. С широким внедрением в производство мобильных координатно-измерительных систем, лазерных технологий, 3D-моделирования, с постоянно растущими требованиями к точности установки магнитных элементов важными становятся вопросы определения реальной точности современных геодезических приборов, выявления возможности использования лазерных трекеров в качестве универсальных геодезических приборов на ускорительных комплексах. Актуальной научно-технической задачей является разработка методики геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов с помощью лазерных трекеров. Для эффективного использования геодезических приборов и оборудования возникает необходимость в разработке новых методик, методических рекомендаций, технологических решений, существенно повышающих точность геодезических измерений с одновременным сокращением временных затрат.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие инженерной геодезии при строительстве и эксплуатации уникальных сооружений внесли Асташенков Г. Г., Большаков В. Д., Васютинский И. Ю., Ключин Е. Б., Конусов В. Г., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Михелев Д. Ш., Новак В. Е., Пимшин Ю. И., Пискунов М. Е., Рязанцев Г. Е., Столбов Ю. В., Уставич Г. А., Шторм В. В., Ямбаев Х. К.

Важную роль в разработке специальных методик геодезических измерений на ускорительно-накопительных комплексах сыграли исследования отечественных специалистов: Пупкова Ю. А., Левашова Ю. И., Бокова М. А., Лавриненко Е. Д., Кирочкина Ю. И.

С появлением новых приборов возникла необходимость в разработке методических рекомендаций по проведению геодезических работ на ускорительных комплексах. Актуализировалась проблема разработки методических и технологических решений для геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов ускорительных комплексов.

Цели и задачи исследования. Цель диссертационного исследования заключалась в разработке и реализации методики геодезического контроля процессов изготовления и периодической юстировки магнитных элементов ускорительных комплексов при помощи API Laser Tracker 3, с определением его реальных точностных характеристик и возможностью построения 3D-моделей.

Для достижения поставленной цели решены следующие *основные задачи*:

– выполнить анализ технологий и технических средств для геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов ускорительно-накопительных комплексов;

– провести исследования по определению точности геодезических измерений лазерного трекера API Laser Tracker 3;

– разработать и реализовать методику геодезического обеспечения изготовления магнитных элементов УНК и процесса юстировки в проектное положение ускорительных комплексов с использованием API Laser Tracker 3 на примере комплекса встречных электронно-позитронных пучков (ВЭПП-2000);

– разработать и внедрить в производственный процесс алгоритмы и пакет прикладных программ для обработки результатов геодезических измерений и 3D-моделирования.

Научная новизна результатов исследований состоит в следующем:

– разработана технологическая схема и методические решения для обеспечения геодезического контроля при проведении магнитных измерений с использованием API Laser Tracker 3, позволившие определить магнитную ось дипольного магнита относительно внешних геодезических знаков;

– разработана и реализована методика юстировки ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 при помощи API Laser Tracker 3;

– на основе выполненных исследований по определению реальной точности измерений API Laser Tracker 3 разработаны методические рекомендации и технологические решения для выполнения работ на ускорительных комплексах, устранены ошибки работы внутреннего электронного уровня прибора.

Основным отличием разработанных методик является использование на ускорительных комплексах нового средства измерения API Laser Tracker 3, позволившего заменить целый парк оборудования, с помощью которого координаты определялись для каждой оси отдельно, установка на комплексе происходила также по каждой оси с применением своей оснастки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в оптимизации пространственно-временной достаточности геодезических измерений при контроле изготовления и установки магнитных элементов ускорительно-накопительных комплексов.

Практическое значение выполненных исследований заключается во внедрении разработанной методики и технологических решений в научно-производственный процесс геодезического контроля изготовления уникального оборудования для отечественных и зарубежных УНК, создаваемых Институтом ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН). При этом эффективно решается научно-техническая задача с существенным повышением скорости проведения работ, точности и надёжности геодезического обеспечения.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы цифрового моделирования, метод наименьших квадратов, линейная алгебра.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты и способ исследования точности работы API Laser Tracker 3;
- технологические решения по обеспечению геодезического контроля изготовления магнитных элементов ускорительных комплексов, повышающие точность и информативность проводимых измерений;
- методические решения для геодезического обеспечения ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 позволили обеспечить требуемую точность и существенно сократить время проведения геодезических измерений и как следствие – простой комплекса.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и представлялись на следующих конференциях:

– на VI Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2010», (19–29 апреля 2010 г., г. Новосибирск);

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

– на VIII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2012», (17–19 апреля 2012 г., г. Новосибирск).

Разработанная методика применена при выполнении работ по контрактам: № 26165 от 23 мая 2007 г. с INI Co Ltd, Япония (дипольные магниты для медицинского центра ионной терапии в Gunma University); № 159-315 от 07 мая 2010 г. с Брукгейвенской Национальной Лабораторией, США (изготовление бустера для комплекса NSLS-II); № TD-100410-d-TZI от 09 ноября 2010 г. с EBG MedAustron, Австрия (24 дипольных магнита синхротрона МВН-С для ионного центра терапии рака); № 120406 от 23 июля 2012 г. с EBG MedAustron, Австрия (13 дипольных магнита каналов высокой энергии МВН-Е для ионного центра терапии рака) – и другим контрактам. Методика геодезического контроля ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000 используется в ИЯФ СО РАН.

1 АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

1.1 Первые ускорительные комплексы

В 1956 году Дональд Керст предложил использовать сталкивающиеся пучки протонов для изучения физики элементарных частиц, а Джерард О'Нил предложил использовать накопительные кольца (storage rings) для получения интенсивных пучков[91]. Активные работы по созданию коллайдеров начались одновременно в конце 1950-х годов в лабораториях Фраскати (Италия), SLAC (США) и ИЯФ (СССР) [16, 76, 77].

Первым заработал электрон-позитронный коллайдер AdA, построенный под руководством Бруно Тушека во Фраскати. Однако, первые результаты были опубликованы (1966) на год позже, чем наблюдения упругого рассеяния электронов (1965) на встречных электронных пучках (ВЭП-1), машине, созданной под руководством Г. И. Будкера [7]. Ещё чуть позже были получены пучки в американском ускорителе. Эти три первых коллайдера были тестовыми машинами, продемонстрировавшими возможность изучения физики элементарных частиц на коллайдерах. Дальнейшая история развития коллайдеров приведена в таблице 1.1.

Первым адронным коллайдером стал протонный синхротрон ISR, запущенный в 1971 году CERN с энергией 32 ГэВ в пучке.

Из таблицы 1.1 видно, что с созданием новых и модернизацией действующих установок происходит все большее увеличение светимости, что в свою очередь накладывает дополнительные требования на конфигурацию и размеры ускорительных комплексов.

Таблица 1.1 – История коллайдеров

Ускоритель	Центр, город, страна	Годы работы	Максимальная энергия пучка, ГэВ	Периметр, м
AdA	Frascati, Италия	1962 – 1964	0,25	3,0
ВЭП-1	ИЯФ, Новосибирск, Россия	1963 – 1968	0,16	2,7
ВЭПП-2	ИЯФ, Новосибирск, Россия	1965 – 1974	0,70	11,5
ВЭПП-2М	ИЯФ, Новосибирск, Россия	1974 – 2000	0,70	12,0
ВЭПП-2000	ИЯФ, Новосибирск, Россия	с 2006	1,00	24,0
DAFNE	Frascati, Италия	с 1999	0,70	98,0
ВЭПП-4М	ИЯФ, Новосибирск, Россия	с 1994	6,00	366,0
ISR	CERN	1971 – 1984	31,50	948,0
PEP-II	SLAC, Стэнфорд, США	1999 – 2008	12,00	2200,0
КЕКВ	КЕК, Япония	1999 – 2010	8,00	3016,0
Tevatron	Fermilab, США	с 1987	980,00	6290,0
SppS	CERN	с 1981	315,00	6900,0
LHC	CERN	с 2008	3500,00 (планируется 7000,00),	26659,0

С течением времени размеры установок становятся больше, усложняется их конструкция. Как следствие, увеличивается количество магнитных элементов, точность их изготовления и взаимного позиционирования на установке.

Возникает необходимость в применении современных, высокоточных, лазерных измерительных систем – лазерных трекеров. Таким образом актуализируется научно-техническая задача по разработке методик работы с лазерными трекерами при контроле изготовления и установки элементов ускорительно-накопительных комплексов.

1.2 Требования к точности позиционирования элементов ускорительно-накопительных комплексов

С увеличением размеров ускорительных комплексов создавались и модернизировались методики установки технологического оборудования в проектное положение [2, 5, 29, 38, 42, 53, 60]. Параллельно с этим шла непрерывная разработка и модернизация оборудования для производства высокоточных геодезических измерений [57, 65, 67, 69], а так же разработка методов и средств поверки и калибровки [20, 46, 50, 51, 62].

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 локальной системы координат. Оставшиеся три – это вращения вокруг этих осей. По каждой из осей координат требования к точности установки будут отличаться. Зависит это от того, как магнитный элемент установлен в общей структуре ускорительного комплекса. Более точными будут требования на установку элементов по радиусу ускорительного кольца и высоте. Вдоль орбиты точность меньше. Разные магнитные элементы имеют разные требования. В таблице 1.2 приведены обобщенные требования к точности юстировки магнитных элементов ускорительных комплексов.

Таблица 1.2 – Обобщенные допуски на точность юстировки магнитных элементов ускорительных комплексов[33].

Элемент	ΔR , мм	ΔZ , мм	ΔQ , мм	α, ω, 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

Следует подчеркнуть, что для каждой конкретной установки требования к точности могут отличаться от приведенных в таблице 1.2.

1.3 Краткая характеристика комплекса ВЭПП-4м

Наиболее крупными установками в ИЯФ СО РАН являются ВЭПП-3 и ВЭПП-4, образующие единый ускорительно-накопительный комплекс (рисунок 1.1). Ускоренные до энергии 50 МэВ в линейном ускорителе электроны, либо сбрасываются на конвертор для получения позитронов, либо впускаются в синхротрон Б-4. Электроны или позитроны ускоряются в Б-4 до энергии 350 МэВ и перепускаются в накопительное кольцо ВЭПП-3, где накапливаются и ускоряются до энергии 2 ГэВ. Затем, частицы перепускаются в накопительное кольцо ВЭПП-4м, накапливаются и ускоряются до энергии 6 ГэВ. Физические эксперименты проводятся как на ВЭПП-3, так и на ВЭПП-4м.

Накопительное кольцо ВЭПП-4м, периметром ~ 366 м, располагается на 6 м в ниже уровня дневной поверхности, в железобетонном тоннеле прямоугольного сечения, в виде двух полуокружностей, радиусом 45 м, разнесенных прямолинейными промежутками на 40 м.

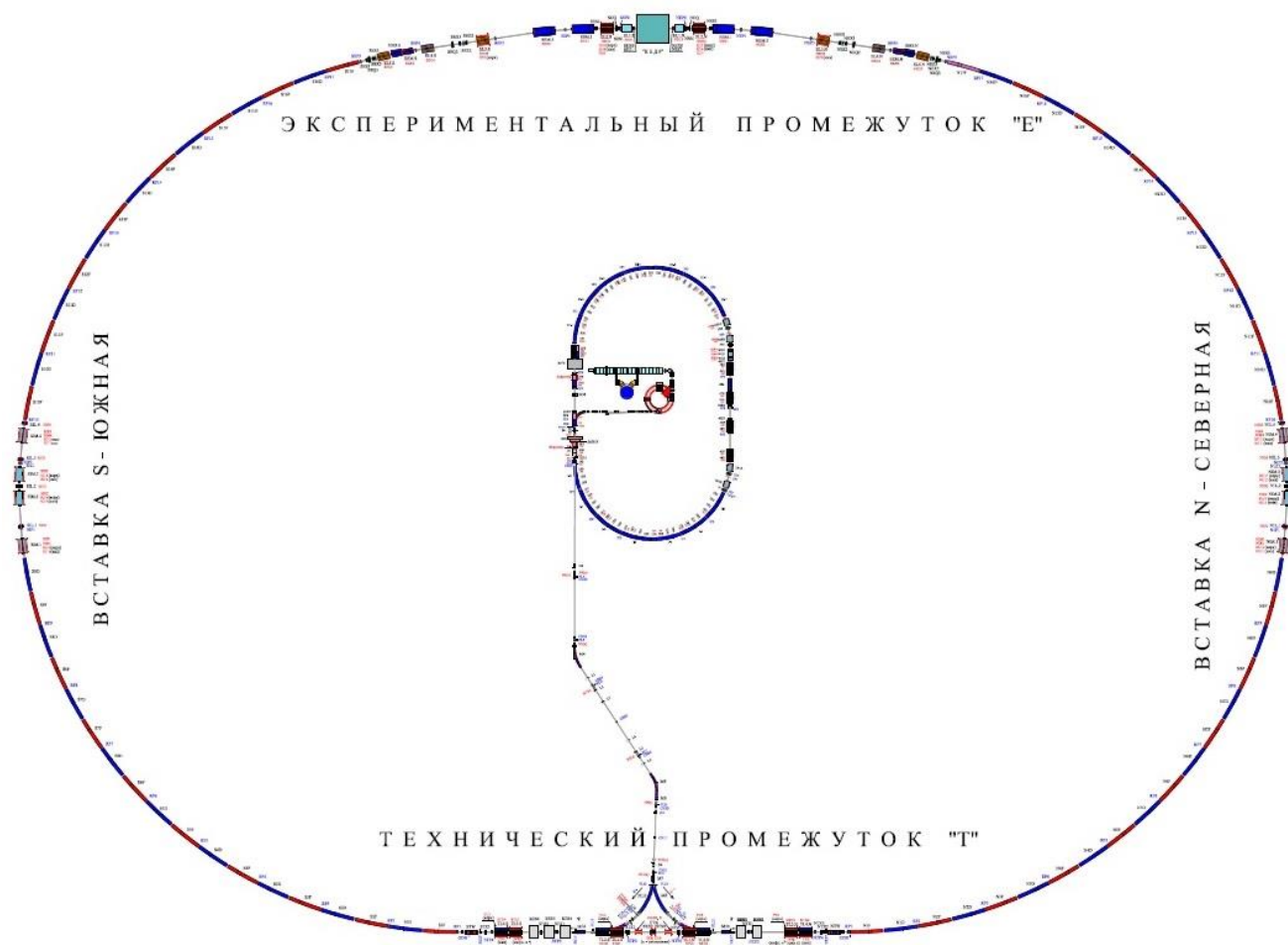


Рисунок 1.1 – Схема комплекса ВЭПП-4м

На потолке каждого полукольца, на специальных кронштейнах, закреплены по 38 магнитных блоков. Таким образом, плоскость орбиты находится на отметке 2,3 м от пола тоннеля, что создает дополнительные трудности при юстировке. Каждый блок представляет собой объединенный в единую конструкцию дипольный магнит и квадрупольную линзу.

В техническом прямолинейном промежутке располагаются восемь квадрупольных линз, соединенных конструктивно в блоки по две, и пять высокочастотных резонаторов. В экспериментальном промежутке находятся десять квадрупольных линз, шесть поворотных дипольных магнитов и 1000–тонный сверхпроводящий детектор с продольным магнитным полем.

Элементы прямолинейных промежутков установлены на подставки, закрепленные на полу. Каждый магнит снабжен механизмами для регулировки

пространственного положения. Верхняя поверхность магнитов является базовой. Магниты имеют по два совмещенных планово-высотных геодезических знака в виде кронштейнов с втулкой диаметром 25,4 мм. Они закреплены в плоскости орбиты на внешней стороне магнитов таким образом, чтобы расстояния между всеми соседними геодезическими знаками в полукольце были одинаковыми. Соответственно, дипольная часть магнита и его линзовая часть имеют по одному геодезическому знаку. Пространственное положение геодезических знаков строго определено относительно орбиты частиц и задано из расчета геометрии установки. Процесс юстировки заключается в установке магнитов таким образом, чтобы их геодезические знаки оказались в положении, заданном проектными координатами X, Y и Z в единой для комплекса в целом системе координат.

Опорная сеть комплекса состоит из 94 геодезических знаков [92]. Плановая и высотная опорная сеть строится отдельно. Для уравнивания плановой опорной сети, автором диссертации, была написана программа на языке программирования Visual Basic под операционную систему Windows [14]. Уравнивание высотной сети выполняется в специальном электронном журнале. Электронный журнал разработан в Excel под операционную систему Windows [4]. Более подробно работа программного обеспечения описана в разделе 4 диссертации.

1.4 Общие сведения об большом адронном коллайдере

Большой адронный коллайдер, (БАК, англ. Large Hadron Collider, LHC) – ускоритель заряженных частиц на встречных пучках, предназначенный для разгона протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца) и изучения продуктов их соударений [6]. Коллайдер построен Европейском центре ядерных исследований (CERN), на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы. БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире. Руководитель проекта – Лин Эванс. В строительстве и в исследованиях участвовали и участвуют более 10 000 учёных и инженеров более чем из 100 стран.

Большим, ускоритель, назван из-за своих размеров: длина основного кольца ускорителя составляет 26 659 м; адронным – из-за того, что он ускоряет адроны, то есть тяжёлые частицы, состоящие из кварков; коллайдером – из-за того, что пучки частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специальных точках столкновения.

В ускорителе предполагается сталкивать протоны с суммарной энергией 14 ТэВ в системе центра масс налетающих частиц, а также ядра свинца с энергией 5,5 ТэВ на каждую пару сталкивающихся нуклонов. На начало 2010 года БАК уже превзошел по энергии протонов предыдущего рекордсмена – протон-антипротонный коллайдер Тэватрон, который в настоящее время работает в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми (США). В будущем, когда наладка оборудования будет завершена, БАК, на порядок превзойдет по энергии остальные коллайдеры, в том числе и релятивистский коллайдер тяжёлых ионов RHIC, работающий в Брукхейвенской лаборатории (США).

Ускоритель расположен в тоннеле, который прежде занимал Большой электрон-позитронный коллайдер. Тоннель с длиной окружности 26,7 км проложен под землёй на территории Франции и Швейцарии. Глубина залегания тоннеля от 50 до 175 м, причём кольцо тоннеля наклонено примерно на 1,4 % относительно поверхности земли. Для удержания, коррекции и фокусировки протонных пучков используются 1624 сверхпроводящих магнита, общая длина которых превышает 22 км. Магниты работают при температуре 1,9 К ($-271\text{ }^{\circ}\text{C}$), что немного ниже температуры перехода гелия в сверхтекучее состояние.

Российские учёные принимают активное участие как в строительстве БАК, так и в создании всех детекторов, которые должны работать на коллайдере.

Стратегия установки LHC.

Для строительства большого адронного коллайдера был использован тоннель, от предыдущей установки большого электрон-позитронного коллайдера (англ. Large Electron-Positron collider, LEP) [64]. Добавлены два крупных подземных сооружения для детекторов ATLAS и CMS. В качестве

опорной геодезической сети используется сеть от LEP, поскольку по ней набрана большая статистика. Особое внимание уделяется зонам, затронутым подземным строительством. Это галереи детекторов ATLAS, CMS, каналы перепуска. Общая схема комплекса представлена на рисунке 1.2 [87].

Организацию работ по установке компонентов ЛНС можно разбить на несколько этапов:

- внутренняя метрология магнитных элементов. Привязка оси пучка к опорным геодезическим знакам на элементе;

- измерение и контроль опорной геодезической сети, расположенной в тоннеле комплекса;

- разбивочные работы по полу тоннеля. Определение места крепления подставок. Точность установки подставок относительно их теоретического положения ± 3 мм;

- монтаж магнитных элементов в тоннеле. Геодезический контроль положения оси пучка в тоннеле;

- предварительная установка для сборки вакуумных камер;

- окончательная высокоточная установка;

- после установки выполняется сглаживание. Относительная точность установки составила 0,150 мм на скользящем участке длиной 150 м [97].

Выполнение каждого пункта регламентируется двумя документами. Первый документ, спецификация на инженерные работы, которые предстоит сделать с указанием точности их выполнения, исходными данными, комплектом чертежей. Второй документ определяет условия проведения работ (чистоту, освещенность тоннеля, наличие других работников в тоннеле), ситуацию в тоннеле до, вовремя и после окончания работ, а так же обязанности всех заинтересованных групп.

Кроме этого существует процедура, дающая информацию о профессиональных навыках персонала, необходимых ресурсах и оборудовании, метрологии, которая будет применяться, и все аспекты, которые, касаются качества проведения инженерно-геодезических работ.

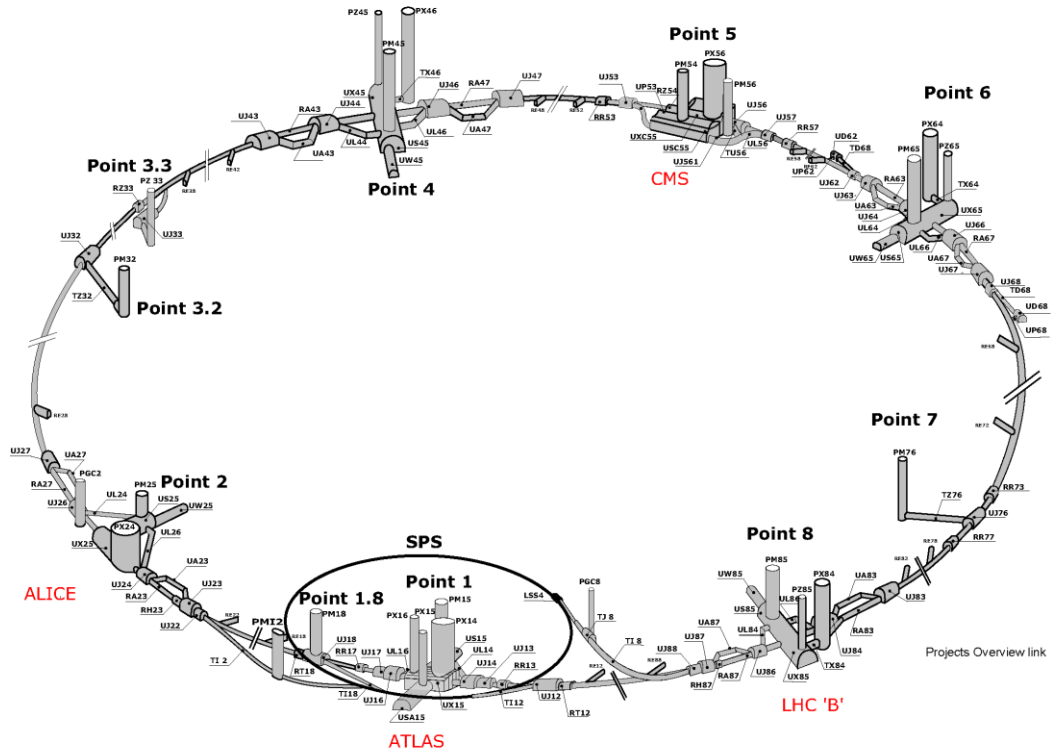


Рисунок 1.2 – Комплекс большого адронного коллайдера

Составляются диаграммы рабочего процесса. Они показывают порядок операций, отведенное время, необходимые ресурсы, обязанности для всех участников процесса.

Все эти документы интегрированы в официальный базовый проект и могут быть доступны для всех заинтересованных лиц.

1.5 Общие сведения о Брукгейвенской национальной лаборатории

Брукгейвенская национальная лаборатория (англ. Brookhaven National Laboratory, BNL) – находится в Аптоне штат Нью-Йорк, основана в 1947 году. Области исследований включают ядерную физику и физику высоких энергий, молекулярную биологию и режим ядерного нераспространения. Открытия, сделанные в этой лаборатории, были награждены семью Нобелевскими премиями. В Брукгейвене расположены следующие установки: релятивистский коллайдер тяжёлых ионов RHIC, сконструированный для исследований кварк-глюонной

плазмы, национальный источник синхротронного излучения (NSLS-II), два циклотрона, используемых в производстве радиоактивных материалов для медицинского применения и ряд других установок. В настоящий момент ведется строительство национального источника синхротронного излучения NSLS-II. Институт ядерной физики СО РАН в 2010 году выиграл тендер на разработку и создания бустера для комплекса NSLS-II. В течении трех лет бустер был спроектирован, изготовлен и собран на территории заказчика [12, 45, 52, 59, 94, 95]. Бустер комплекса NSLS-II запущен в декабре 2013 года.

Национальный источник синхротронного излучения (NSLS-II).

Комплекс NSLS-II состоит из линейного ускорителя, бустера и основного кольца со станциями вывода излучения представлен на рисунке 1.3 [48]. Линейный ускоритель содержит 100 КэВ термоэлектронную пушку, выстреливающую пучок частиц в ускоряющую структуру. Из ускоряющей структуры линейного ускорителя пучок, ускоренный до энергии 200 МэВ, попадает в кольцо бустера. Кольцо бустера имеет периметр 158,39 м.

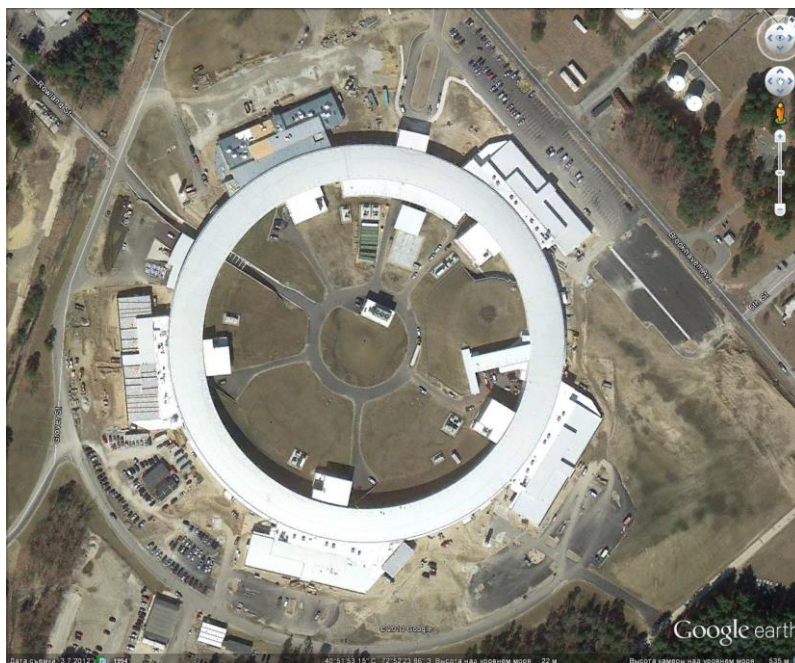


Рисунок 1.3 – Комплекс NSLS-II

Магнитная система бустера предназначена для накопления энергии пучка с 200 МэВ до 1,5–3ГэВ. Ускоренный до заданной энергии пучок попадает в основное кольцо NSLS-II имеющее периметр 791,95 м. На основном кольце будет размещено 60 станций для вывода излучения.

Требования к точности установки основных магнитных элементов бустера для Брукхейвенской Национальной Лаборатории США приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Допуски на точность установки магнитных элементов бустера

Основные виды ошибок	Допуск
Смещение диполя, квадруполя, секступоля, BPM по радиусу и высоте	0,150 мм
Смещение диполя, квадруполя, секступоля, BPM вдоль орбиты	0,500 мм
Вращение диполя, квадруполя, секступоля, BPM вокруг продольной оси (ось пучка)	0,200 мрад
Вращение диполя вокруг радиальной и вертикальной оси	0,100 мрад

Для установки магнитного элемента в ускорительный комплекс на нем предусмотрены, геодезические знаки. Количество и месторасположение геодезических знаков определяется типом элемента и расположением его в структуре ускорителя. Например, квадрупольная линза бустера NSLS-II имеет четыре геодезических знака, а дипольный магнит тринадцать геодезических знаков.

1.6 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, шахтное, 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 опорные геодезические сети установок. Они должны были быть по возможности простыми, что в свою очередь накладывало геометрические ограничения при проектировании установок. Например, опорная 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. Геодезическая сеть располагалась в тоннеле. 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 обуславливают 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. Предложены и реализованы несколько методов сглаживания [33, 34, 54]. Согласно этим методам, перечисленные в таблице 1.3 допуски, должны реализоваться на любом участке длиной в некоторую характерную для ускорителя величину λ , называемую длиной волны бетатронных колебаний.

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 (рисунок 1.4) – геодезический прибор, для измерения расстояний, разработанный в CERN в 1962 году [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.

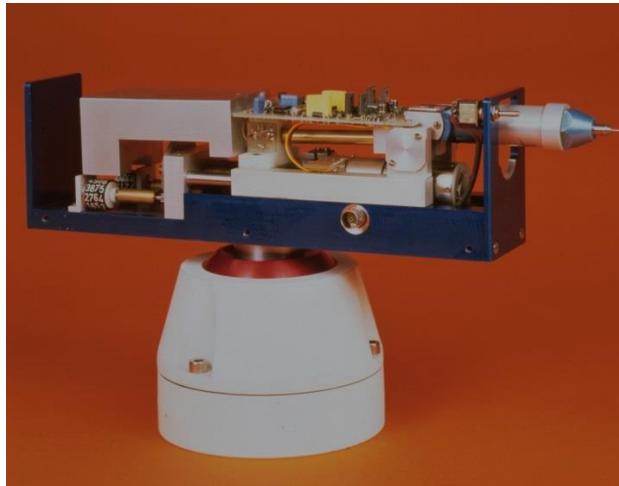


Рисунок 1.4 – Дистинвар

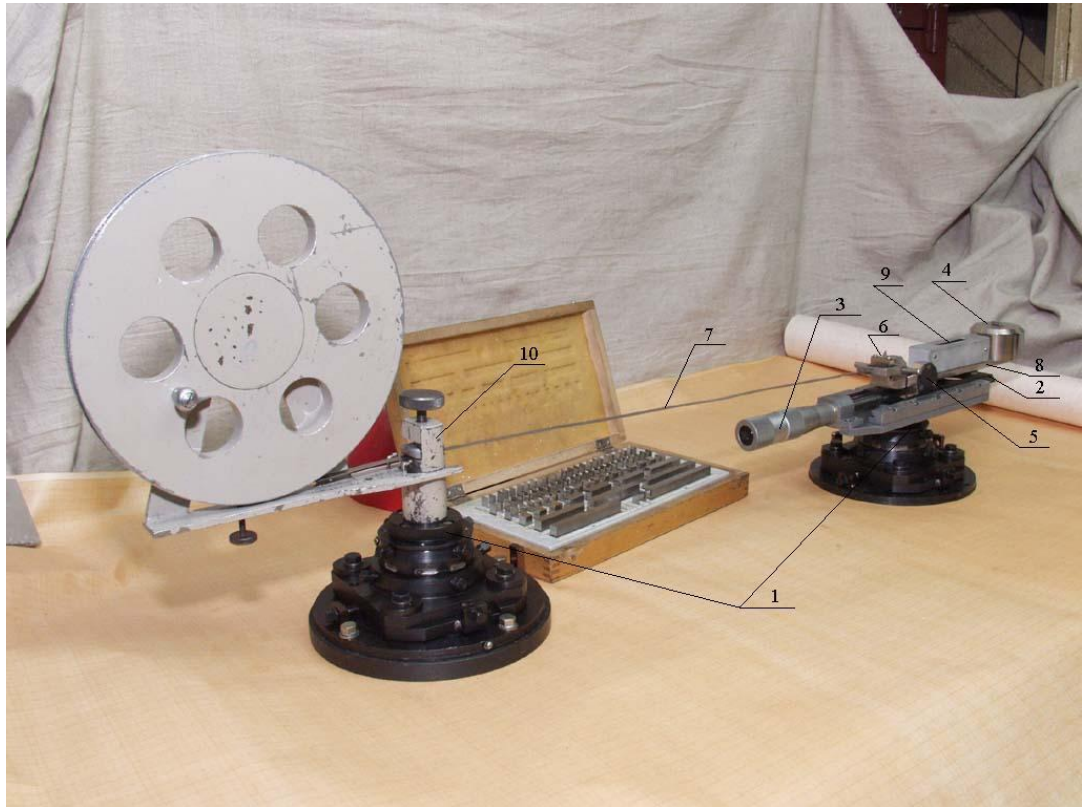
При работе с дистинваром, также как и при работе с инварными проволоками, требовалось проводить калибровку на оптической скамье, впоследствии на компараторе при помощи интерферометра. Дистинвар повысил скорость выполнения геодезических работ на ускорителях. Впоследствии был разработан полностью автоматический 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 уровенный динамостат ВУД.

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

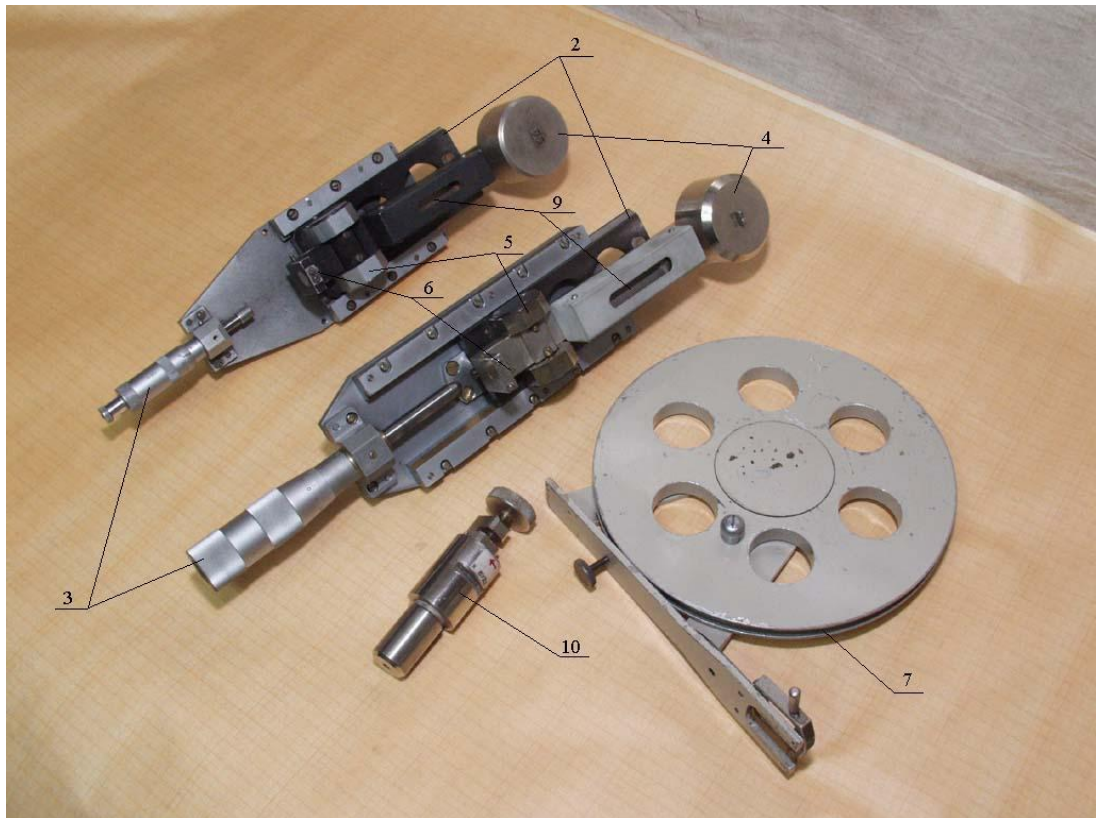
На рисунках 1.5, 1.6 представлен ВУД, с обозначением его компонентов.



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.

Рисунок 1.5 – Общий вид ВУДа

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



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.

Рисунок 1.6 – 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 винтом 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 микрометрического 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 микрометрические винты не приспособлены нести такую осевую нагрузку. Диапазон измерения винта равен 25 мм. Длина линии вычисляется по формуле [37, 66]

$$L = L_0 + (a - a_0) + \Delta t , \quad (1.1)$$

где L_0 – расстояние между посадочными цилиндрами при компарировании;

a_0 – отсчет по микрометрическому винту во время измерений;

a – отсчет по микрометрическому 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. После 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 (рисунок 1.7) представляет собой инварный стержень, на концах которого закреплены вкладыш и микрометр. Торцевое тело микрометра отполировано и расположено параллельно оси вкладыша, а мерное тело микрометра – параллельно оси инварного стержня. Инвар выбран в качестве материала из-за низкого коэффициента линейного расширения, что практически исключает влияние температуры на результаты геодезических измерений.



Рисунок 1.7 – Измерительный инварный жезл

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.

1.7 Постановка задачи исследования

Анализ применяемых ранее методов, приборов, технических средств, для геодезического обеспечения изготовления магнитных элементов и установки технологического оборудования ускорителей, показал, что процесс геодезических измерений был достаточно трудоемким, требовал большого количества разнообразного оборудования и плохо поддавался автоматизации. Так же данный анализ показал возможность использования API Laser Tracker 3 в работах на ускорительных комплексах и контроле изготовления магнитных элементов. Для уверенной работы необходимо оценить реальную точность API Laser Tracker 3, и разработать методики работы при изготовлении и монтаже ускорительных комплексов. На основании этого можно сформулировать несколько задач:

- выполнить анализ технологий и технических средств, для геодезического контроля изготовления и установки магнитных элементов ускорительно-накопительных комплексов;
- провести исследования по определению точности геодезических измерений лазерного трекера API Laser Tracker 3;
- разработать и реализовать методику геодезического обеспечения процесса изготовления магнитных элементов и процесса юстировки в проектное положение ускорительных комплексов с использованием API Laser Tracker 3;
- разработать и внедрить в производственный процесс алгоритмы и пакет прикладных программ для обработки результатов геодезических измерений и 3D-моделирования.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ API LASER TRACKER 3

2.1 Сущность работы и краткая характеристика API Laser Tracker 3

API Laser Tracker 3 (рисунок 2.1) – высокотехнологичный, высокоточный измерительный прибор третьего поколения, основанный на принципе слежения за специальным уголковым отражателем с помощью лазерного луча [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 3 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.



Рисунок 2.1 – Общий вид API Laser Tracker 3

Технические характеристики [74]:

- максимальная скорость бокового смещения объекта: $> 3,0$ м/с ($120''/s$);
- 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: $\pm 0,07''$;
- точность внутреннего уровня: $\pm 2''$.

Точность объемных измерений:

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

Абсолютная погрешность определения 3-мерных координат:

- статическая: ± 5 ppm (2σ) ($25 \mu m$) на 5 м;
- динамическая: ± 10 ppm (2σ) ($50 \mu m$) 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 $10^\circ C$ до $> 40^\circ C$;
- 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.

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.

2.2 Сравнительный анализ мобильных координатно-измерительных машин

На сегодняшний день на мировом рынке присутствуют три основные компании, производящие трекеры:

- Leica Geosystems (с конца 2005г являющаяся частью Hexagon);
- FARO (ранее SMX);
- API .

Современные трекеры работают по единому принципу – имеется абсолютный дальномер для начальной привязки отражателя, датчики углов и интерферометр для определения расстояний в непрерывном режиме, правда, в последнее время появились “усеченные вариант только с абсолютным дальномером” [21, 72, 80, 88].

Внешний вид трекеров представлен на рисунках 2.2, 2.3, 2.4[1, 79, 89]



Рисунок 2.2 – Faro ION



Рисунок 2.3 – API Laser Tracker 3



Рисунок 2.4 – Leica Absolute Tracker™(AT901)

Конструктивно трекары различаются местом крепления собственно интерферометра, количеством преломляющих зеркал, организацией интерфейса, кабелями и т. д. Геометрические размеры отражателей и подставок одинаковы и изготавливаются двумя сторонними компаниями. Однако покрытие зеркал отражателей отличается и привязано к длине волны лазера прибора.

У лазерных трекаров семейства FARO интерферометр и абсолютный дальномер расположены в неподвижном корпусе (рисунок 2.5), соединенном с подвижной измерительной головкой волоконно-оптическим каналом для транспортировки лазерного луча [90].

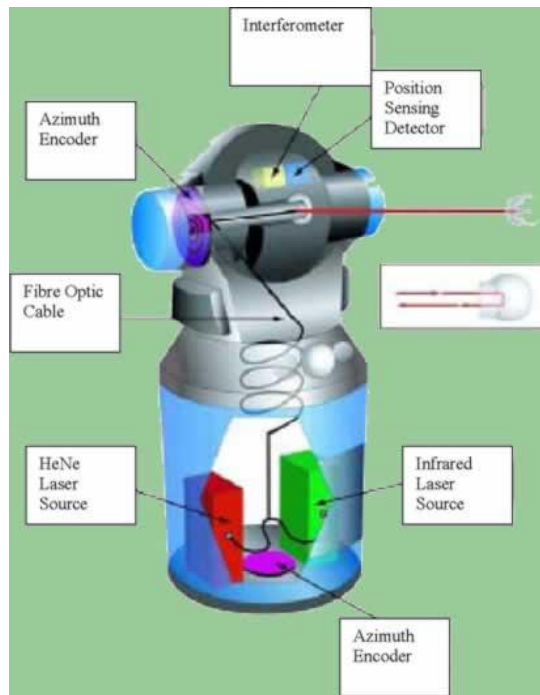


Рисунок 2.5 – Внутреннее устройство Faro ION

В лазерных трекерах Leica (рисунок 2.6) для вывода излучения используется система зеркал, закрепленных как в подвижной, так и в неподвижной части прибора. Интерферометр и абсолютный дальномер расположены так же, как и у FARO в неподвижной части прибора [44].

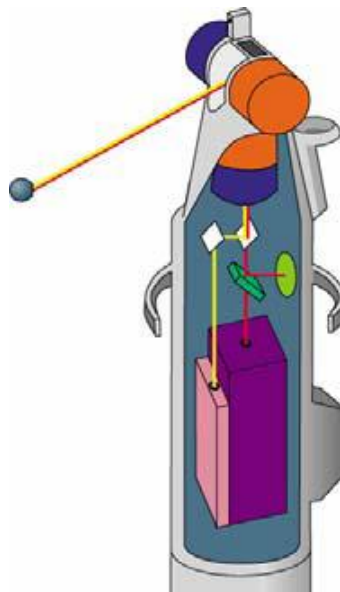


Рисунок 2.6 – Внутреннее устройство Absolute Tracker™(AT901)

У лазерных трекеров API интерферометр и абсолютный дальномер расположены в подвижной измерительной головке (рисунок 2.7). Что минимизирует ошибки передачи лазерного луча из неподвижной части прибора в подвижную.

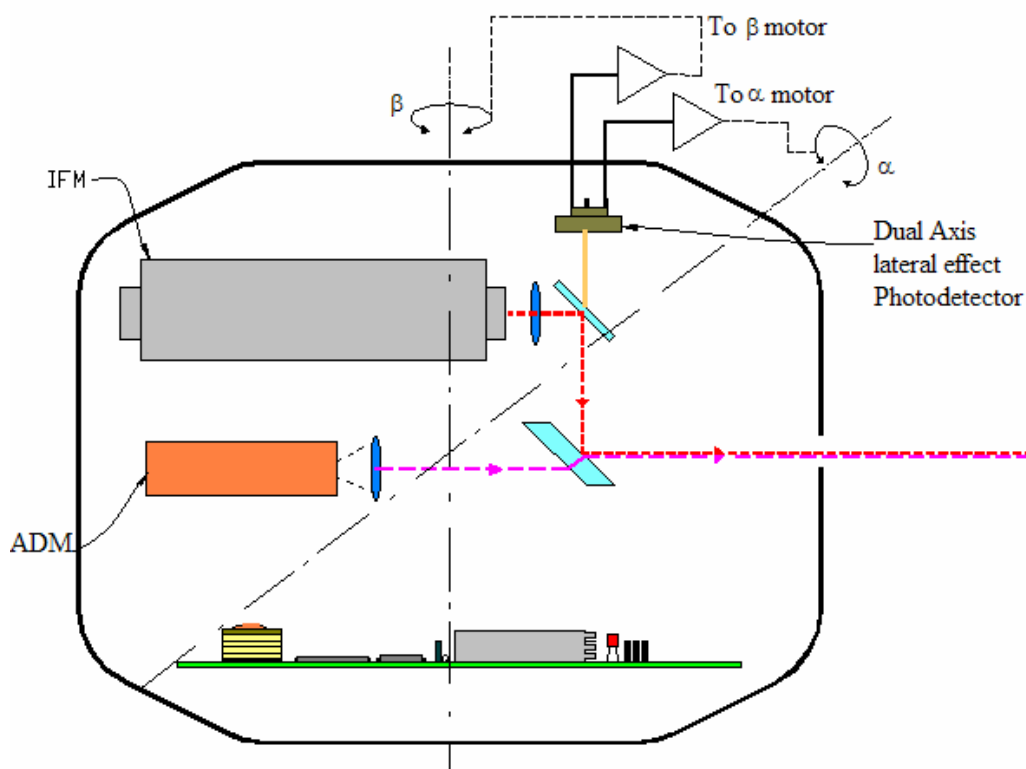


Рисунок 2.7 – Внутреннее устройство API Laser Tracker3

В качестве экземпляров для сравнения были выбраны наиболее распространенные:

- FARO ION;
- API Tracker 3;
- Leica Absolute Tracker™(AT901).

Сравнение мобильных координатно-измерительных машин представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1– Сравнение мобильных координатно-измерительных систем

Трекер	API Tracker 3	Leica Absolute Tracker™(AT901)	FARO ION
Разрешение углов	0,018"	0,14"	нет данных
Разрешение линейное	0,08 мкм	0,32 мкм	0,158 мкм
Точность измерения углов	3,5 мкм/м	7,5 мкм + 3 мкм/м	20 мкм + 5 мкм/м
Точность измерения расстояний	0,5 мкм/м	0,4 мкм + 0,3 мкм/м	16 мкм + 0,8 мкм/м
Объемная точность в режиме интерферометра	5 мкм/м	± 15 мкм + 6 мкм/м	± 26 мкм + 5 мкм/м
Объемная точность в режиме абсолютного дальномера	± 15 мкм/м	± 15 мкм + 6 мкм/м	± 26 мкм + 5 мкм/м
Дальность работы	60 м	80 м	55 м
Диапазон горизонтальных углов	640°	Весь диапазон без стопоров.	540°
Диапазон вертикальных углов	+77°/- 60°	+45°/- 45°	+72,5°/- 52,5°
Диапазон температур	от - 10°C до + 45°C	от 0°C до + 40°C	от - 15°C до + 50°C
Габаритные размеры	185x190x360 мм	290x240x620 мм	311x311x556 мм
Масса измерительной головки	8,5 кг	22 кг	19,5 кг
Масса контроллера	3,2 кг	17 кг	5,2 кг

На основании таблицы 1.2 можно сделать вывод, что API Laser Tracker 3 по совокупности показателей, таких как точность измерения углов, объемная точность в режиме интерферометра и абсолютного дальномера, диапазону измерения вертикальных и горизонтальных углов, а так же весу и габаритным размерам (что тоже оказалось важно) предпочтительнее для контроля изготовления и установки элементов ускорительных комплексов.

2.3 Стандартные марки (отражатели) для лазерных трекеров

Стандартные отражатели представляют собой триппель-призму, запрессованную в металлическую сферу, так, что бы центр призмы совпадал с центром сферы. Сферы имеют стандартный диаметр 1,5 и 0,5 дюйма (рисунок 2.8). Отклонение от сферы не превышает 5 мкм, отклонение центра призмы от центра сферы не превышает 10 мкм (для 1,5 дюймовой марки).



Рисунок 2.8 – Стандартный отражатель для лазерного трекера

Поскольку точность определения расстояний зависит в том числе и от угла падения луча в отражатель – необходимо избегать углов свыше 20° .

По мере эксплуатации может происходить деформация отражателя или смещение зеркал. Для контроля качества отражатель ставят на “домашнюю точку” трекера и проворачивают. При изменении показаний свыше допустимых (0,02 мм) отражатель считается непригодным для точных работ.

Стандартными подставками (рисунок 2.9) считаются подставки под отражатель с хвостовиками и без хвостовика. Выпускаются подставки как с метрическими, так и с дюймовыми размерами (диаметр хвостовика и расстояние от плоскости хвостовика до центра отражателя).



Рисунок 2.9 – Стандартные подставки под отражатель

Стандартными посадочными диаметрами хвостовика считаются 6; 8; 10; 12 мм и 1/4; 1/2; 1 дюйм. Расстояние от основания до центра отражателя (offset) – 25 мм либо 25,4 мм (для дюймовых подставок) (рисунок 2.10).

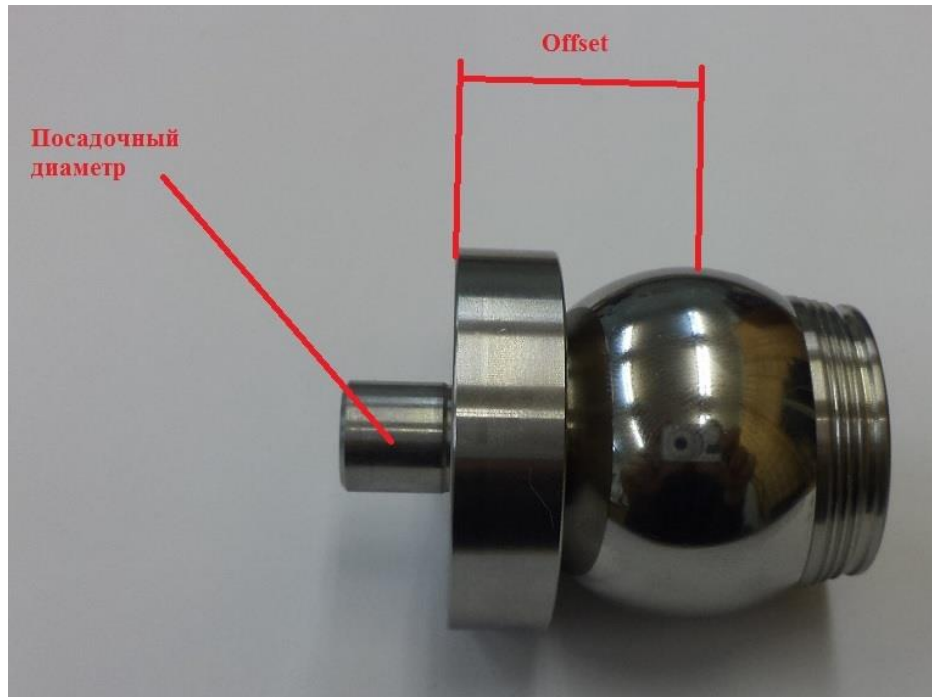


Рисунок 2.10 – Отражатель на подставке

При проведении измерений нужно помнить с какой оснасткой выполнялись работы. Всегда учитывать offset во время выполнения обработки результатов измерений.

2.4 Экспериментальные исследования по влиянию прогрева API Laser Tracker 3 на точность геодезических 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].

Одна из задач диссертационного исследования заключалась в определении влияния времени прогрева API Laser Tracker 3 на точность геодезических измерений. Было проведено следующее исследование. Лазерный трекер установлен на геодезический знак компаратора ИЯФ СО РАН. Геодезический знак для которого определялись координаты, находился на расстоянии 19,642 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 впоследствии вычислял среднее арифметическое значение по формулам:

$$X_{\text{изм}} = \frac{\sum(\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)}{50}, \quad (2.1)$$

$$Y_{\text{изм}} = \frac{\sum(\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)}{50}, \quad (2.2)$$

$$Z_{\text{изм}} = \frac{\sum(\cos\beta \cdot S)}{50}. \quad (2.3)$$

Средняя квадратическая погрешность[56] одного измерения для расстояния 19,642 м составила 0,037 мм и вычислялось по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(((\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)_i - X_{\text{изм}})^2 + ((\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)_i - Y_{\text{изм}})^2 + ((\cos\beta \cdot S)_i - Z_{\text{изм}})^2)}{50}}. \quad (2.4)$$

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 рисунке 2.11.

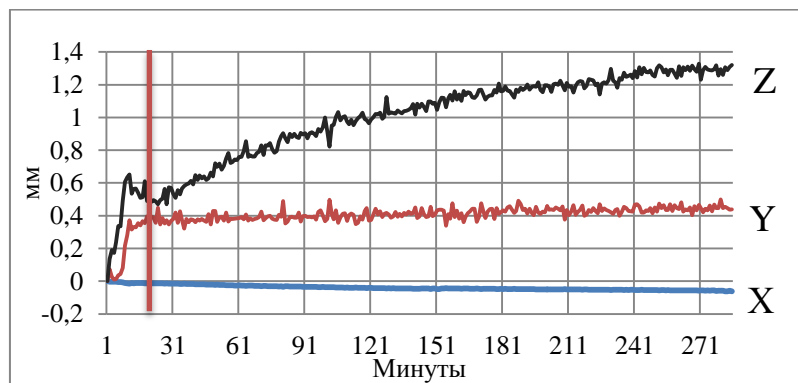


Рисунок 2.11 – Изменение по трем координатам

Рассмотрим каждый график в отдельности (рисунки 2.12, 2.13, 2.14.) в локальной системе координат. Где ось X параллельна направлению на измеряемый геодезический знак.

Анализ графика на рисунке 2.12 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.

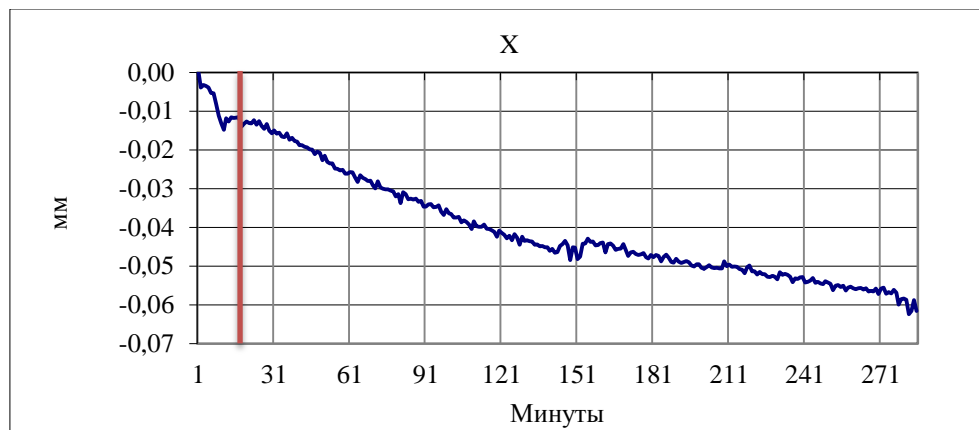


Рисунок 2.12 – Изменение координаты X

Изменение положения определяемого геодезического знака по оси Y (рисунок 2.13) соответствует изменению положения горизонтального круга API Laser Tracker 3. Так же как и на графике рисунка 2.12 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.

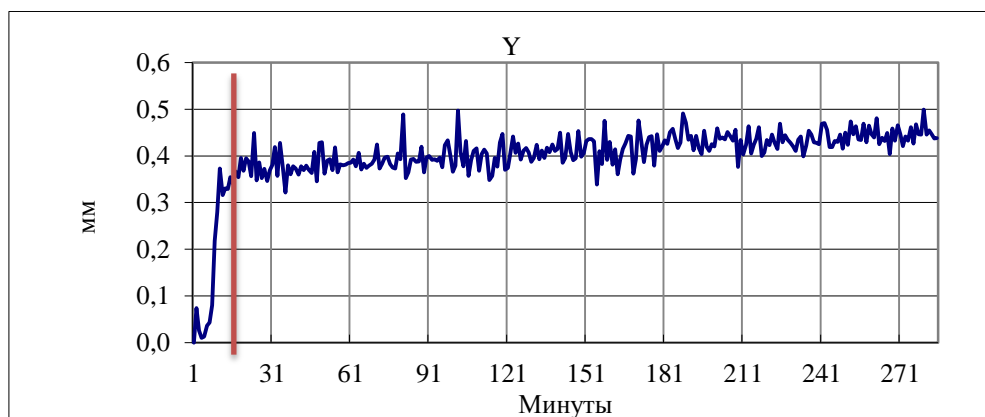


Рисунок 2.13 – Изменение координаты Y

График на рисунке 2.14 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.

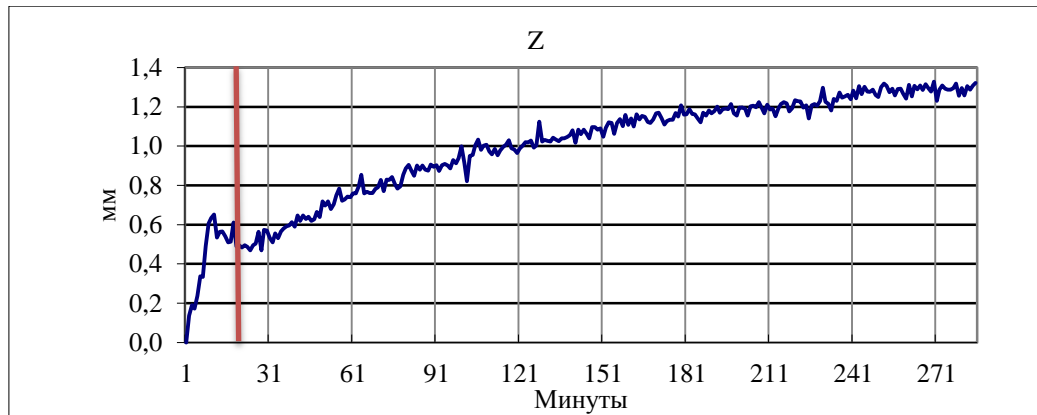


Рисунок 2.14 – Изменение координаты Z

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 точек 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 2.14. 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 [22] приходится на временной интервал, когда происходит скачок приведенный, на графиках (рисунки 2.12, 2.13, 2.14), что не дает уверенности в точности последующих измерений.

Целесообразно высокоточные работы выполнять в короткий промежуток времени, делать контрольные измерения на опорные геодезические знаки, при необходимости производить повторные привязки к опорной геодезической сети.

2.5 Исследование точности линейных измерений

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 некоего базового значения. Была проведена серия измерений на компараторе ИЯФ СО РАН для определения относительной точности API Laser Tracker3. В качестве эталона взят интерферометр Hewlett-Packard 5529A (рисунок 2.15). Технические характеристики:

- 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 [23, 70].



Рисунок 2.15 – Интерферометр Hewlett-Packard 5529A

Для совместных измерений длин линий, API Laser Tracker 3 установили на противоположном конце направляющей компаратора в створ с интерферометром HP 5529A (рисунок 2.16).

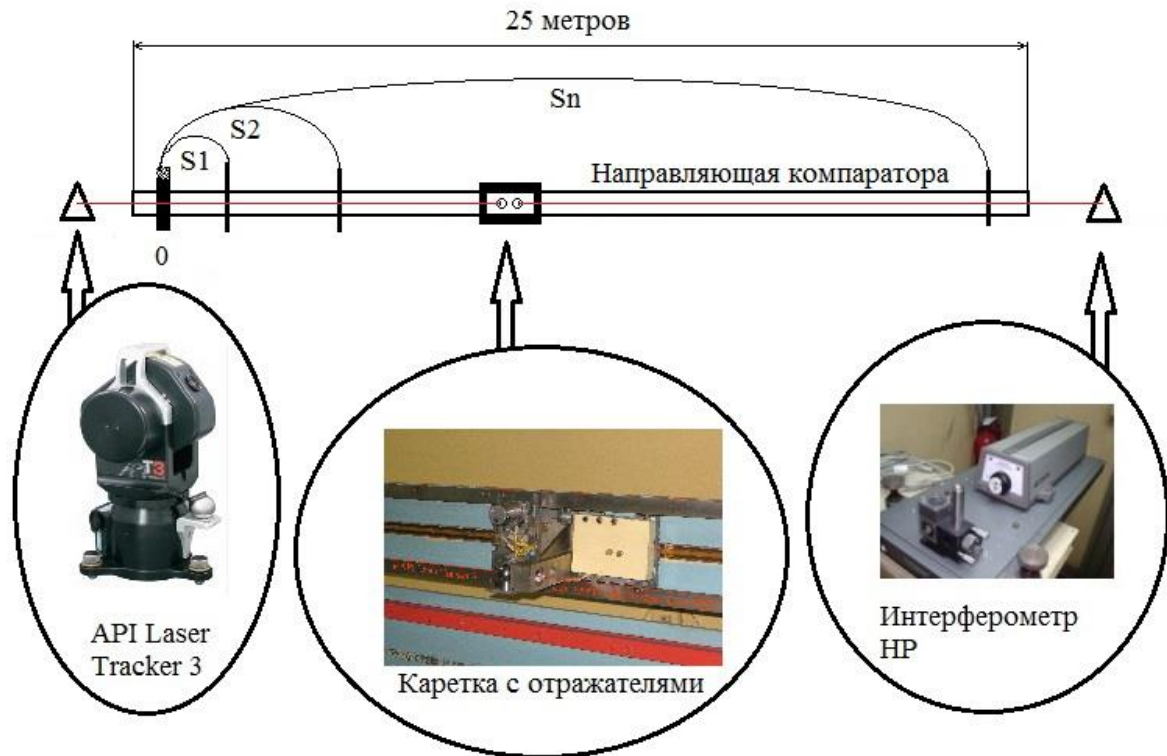


Рисунок 2.16 – Схема расположения оборудования на компараторе ИЯФ СО РАН

Для выполнения исследований была модернизирована каретка интерферометра. На ней, с обратной стороны от призмы интерферометра, установлен отражатель трекера (рисунок 2.17). Каретка с двумя отражателями позволяла выполнять измерения лазерным трекером и интерферометром одновременно.

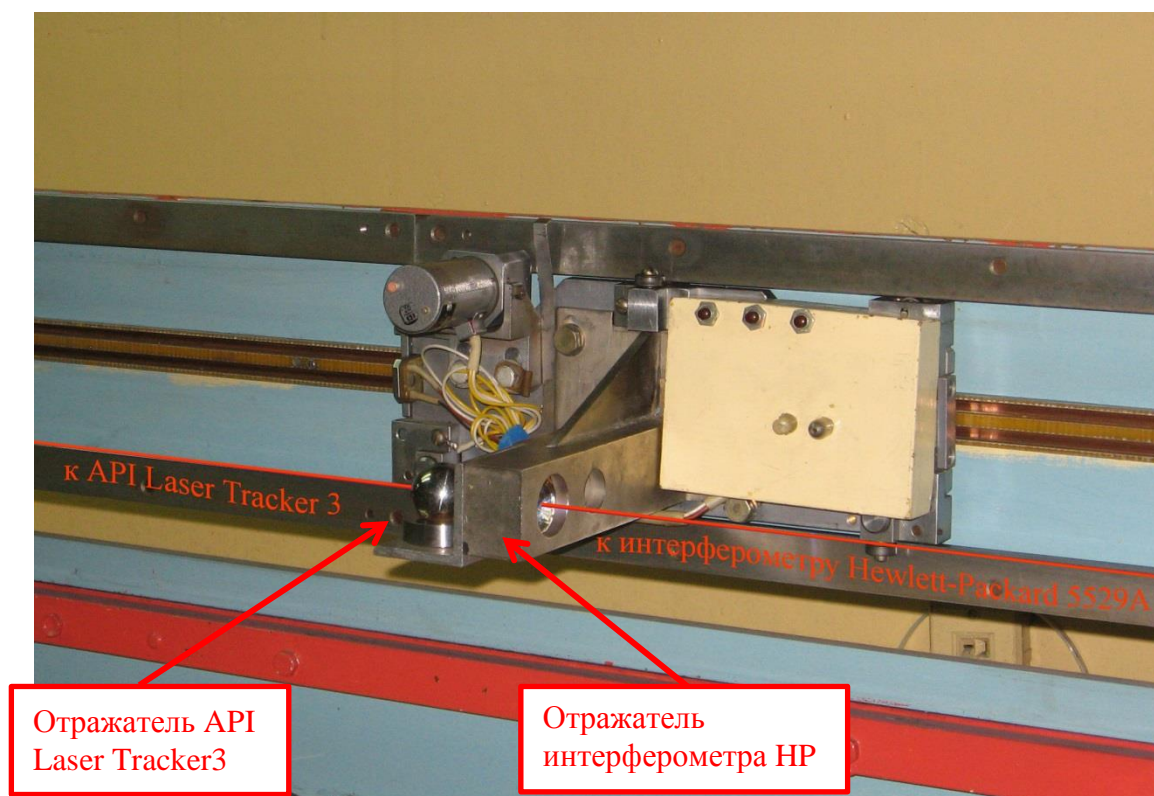


Рисунок 2.17 – Каретка с двумя отражателями

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 [26]; на длину 10 м с шагом 0,5 м; на длину ~ 25 м с шагом 0,5 м.

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 интерферометру 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, ближайšie к API Laser Tracker 3. Расстояния для API Laser Tracker 3 вычислялись по формуле

$$S_{API} = \sqrt{\frac{(((\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)_0 - (\cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)_n)^2 + ((\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)_0 - (\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot S)_n)^2 + ((\cos\beta \cdot S)_0 - (\cos\beta \cdot S)_n)^2)}{.}} \quad (2.5)$$

Для интерферометра НР 5529А начальное положение каретки было принято за ноль и дальнейшее вычисление расстояний производилось по формуле

$$S_{HP} = X_0 - X_n \quad (2.6)$$

На рисунке 2.18 представлены разницы длин линий, полученных лазерным трекером и интерферометром НР

$$\Delta = S_{HP} - S_{API} \quad (2.7)$$

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

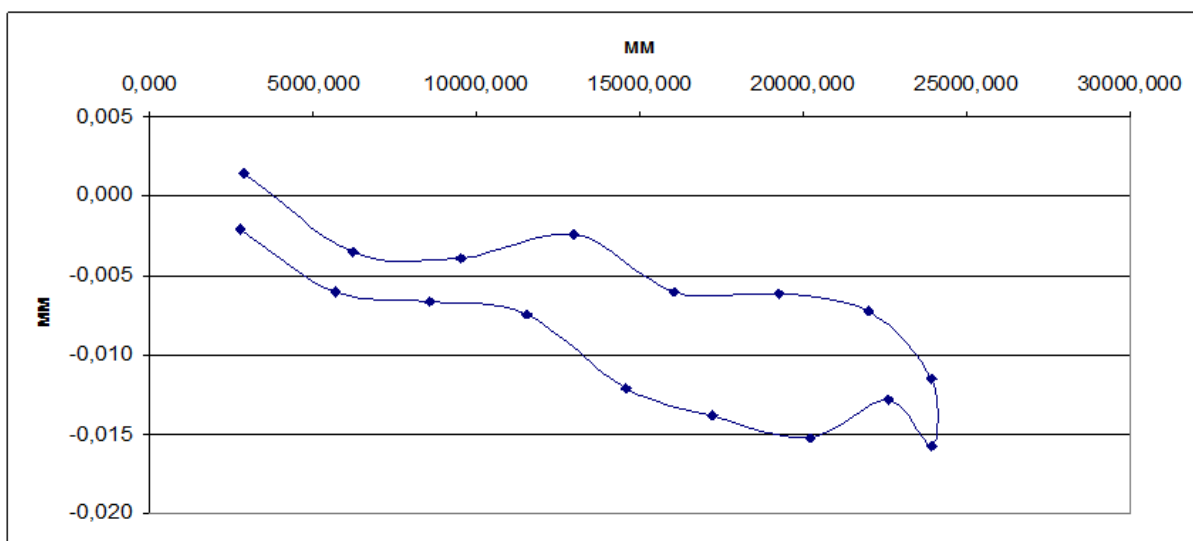


Рисунок 2.18 – Разность расстояний, измеренных API Laser Tracker 3, в режиме IFM с интерферометром НР

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 трекера 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.

Сравнение ADM режима с интерферометром является наиболее важным этапом исследования, так как большинство измерений производится в этом режиме. Измерения производились для расстояний 10 м и 24 м. На рисунке 2.19 показана разность измеренных расстояний API Laser Tracker 3 в режиме ADM с интерферометром НР для расстояния 24 м.

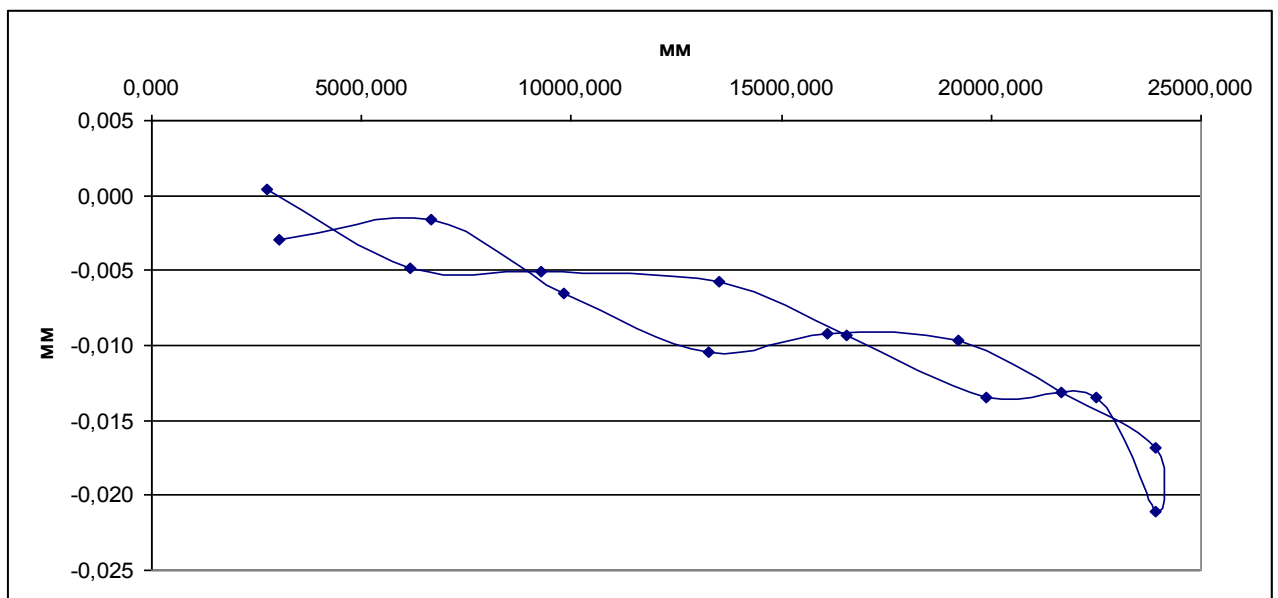


Рисунок 2.19 – Разность расстояний, измеренных API Laser Tracker 3, в режиме ADM с интерферометром НР

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. 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. Выполнено 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 2.20.

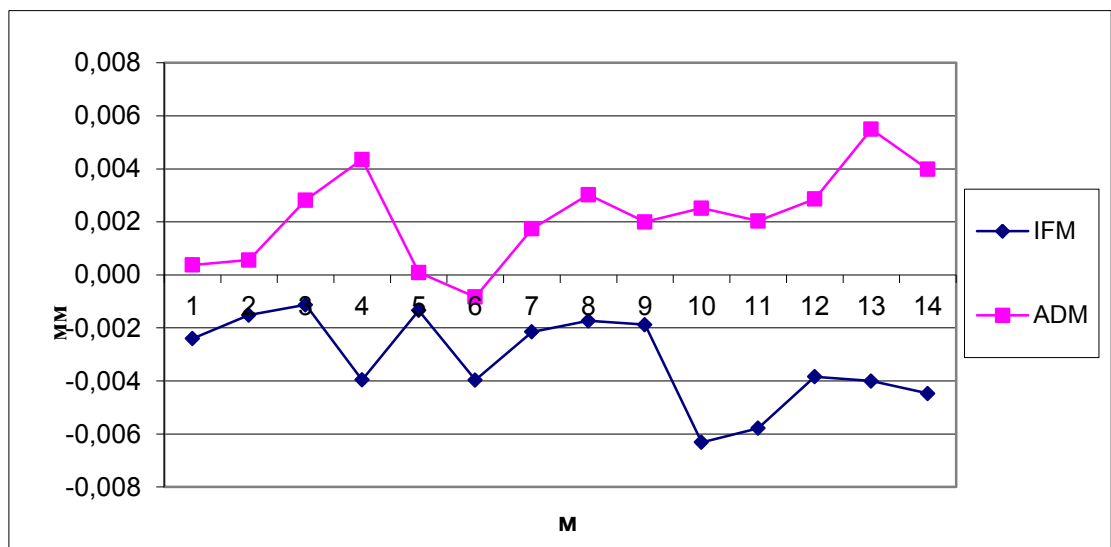


Рисунок 2.20 – Разность расстояний измеренных API Laser Tracker 3 в двух режимах с интерферометром HP 5529A

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 проведенных измерений автором выполнено следующее 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:

$$\sigma X = 0,054 \text{ мм};$$

$$\sigma Y = 0,035 \text{ мм};$$

$$\sigma Z = 0,034 \text{ мм}.$$

2.6 Исследование внутреннего электронного уровня

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]. Ошибка определения превышений 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 ошибки определения превышений 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 поворачивающую плиту, имеющую три точки опоры, с возможностью изменения горизонта $\pm 1^\circ$.

Геодезические знаки конструкции Лебедева Н. Н. и усовершенствованные в ИЯФ СО РАН (рисунок 2.21) представляют собой шлифованную площадку с дюймовым отверстием, выполненным с точностью $+ 0.009$ мм. Знаки закреплены на бетонных колоннах, не связанных со зданием.

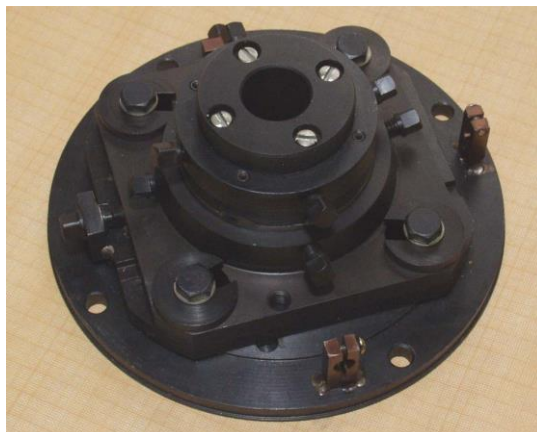


Рисунок 2.21 – Геодезический знак

Для модернизации прибора была изготовлена специальная площадка с прижимными и юстировочными винтами. В ней поместили уровень с ценой деления 6'. Площадка закреплена в ручке API Laser Tracker 3 на оси вращения горизонтального круга (рисунок 2.22).

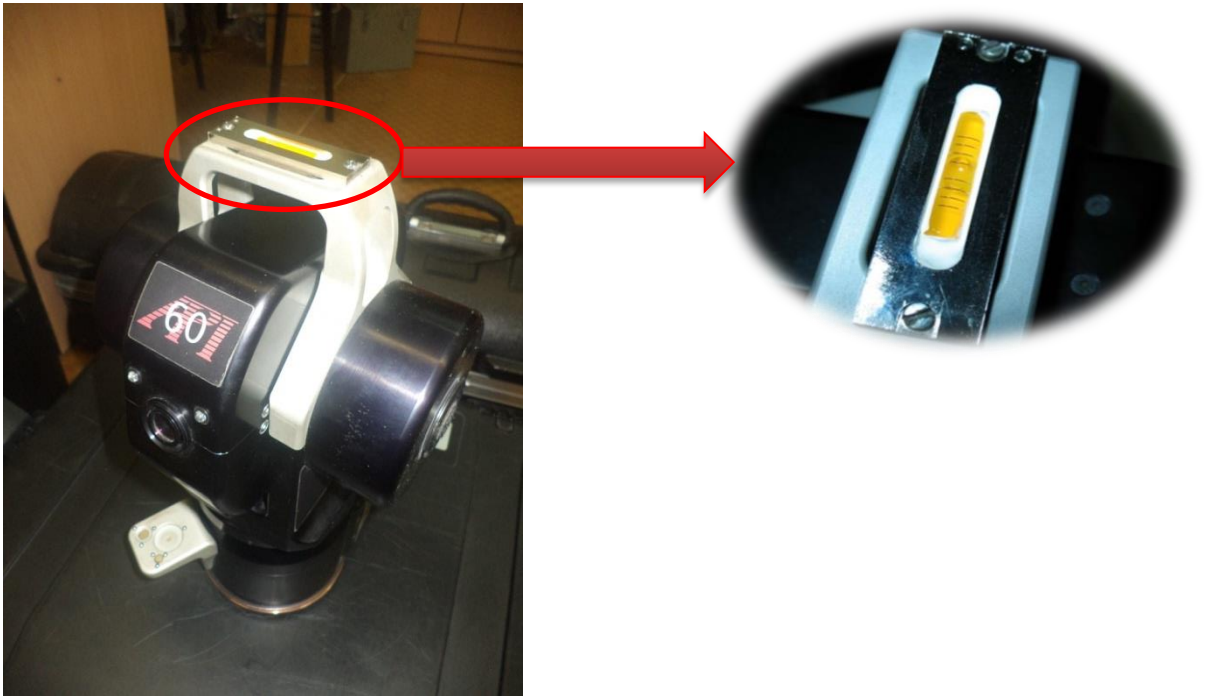


Рисунок 2.22 – Изготовленный уровень в ручке прибора

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. Проверен диапазон наклона оси Y на $\pm 1^\circ$ с шагом 5', при этом ось X горизонтальна, установлена по уровню, закреплённому на оси вращения API Laser Tracker 3. Наклон осуществлялся только по одной оси!

Перед измерением 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 изменялся на 5', прибор приводился к электронному уровню, повторялось измерение (трижды). Пройден диапазон от минус 60' до плюс 60'. Результат измерений представлен на графике рисунка 2.23. Среднее квадратическое отклонение от трендовой прямой составляет 0,038 мм. Превышение между контрольными точками 0,125 мм измерено при помощи нивелира Ni 007, вычтено из превышений, измеренных API Laser Tracker 3.

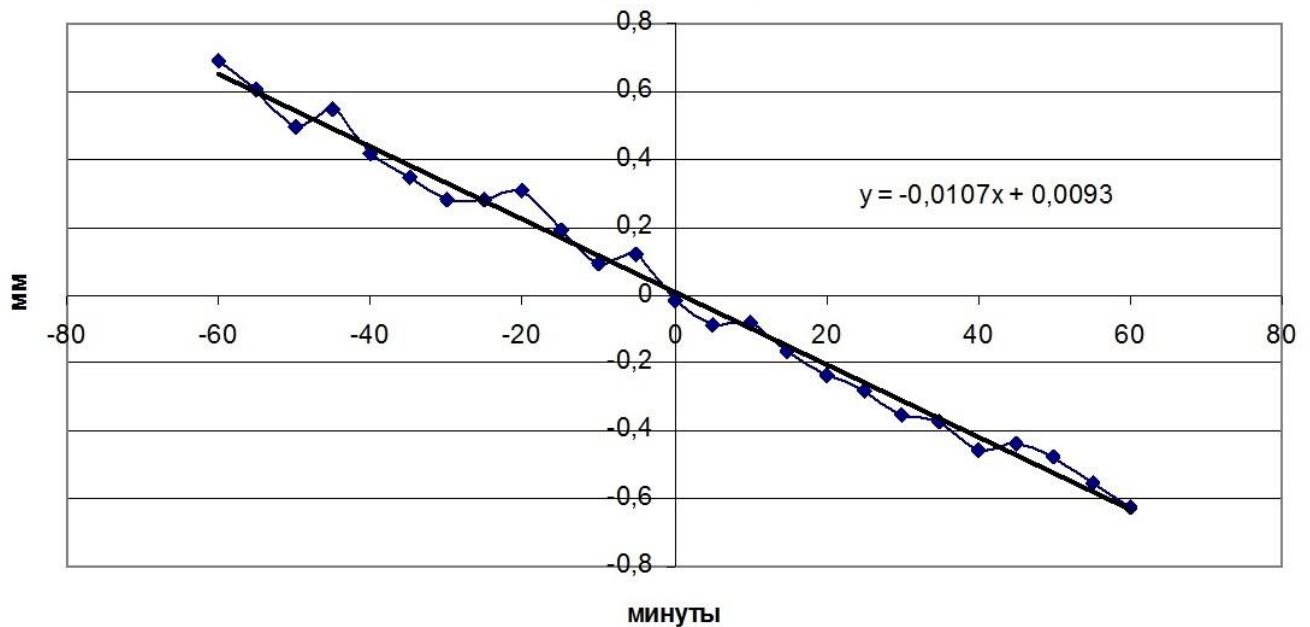


Рисунок 2.23 – График величины ошибки измерения превышений API Laser Tracker 3 с наклоном экзаменатора по оси X

Выполнен повторный цикл измерений с повторным включением и инициализацией инструмента. “Домашняя точка” была развернута на 90°. Результат измерений представлен на графике рисунка 2.24. 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.

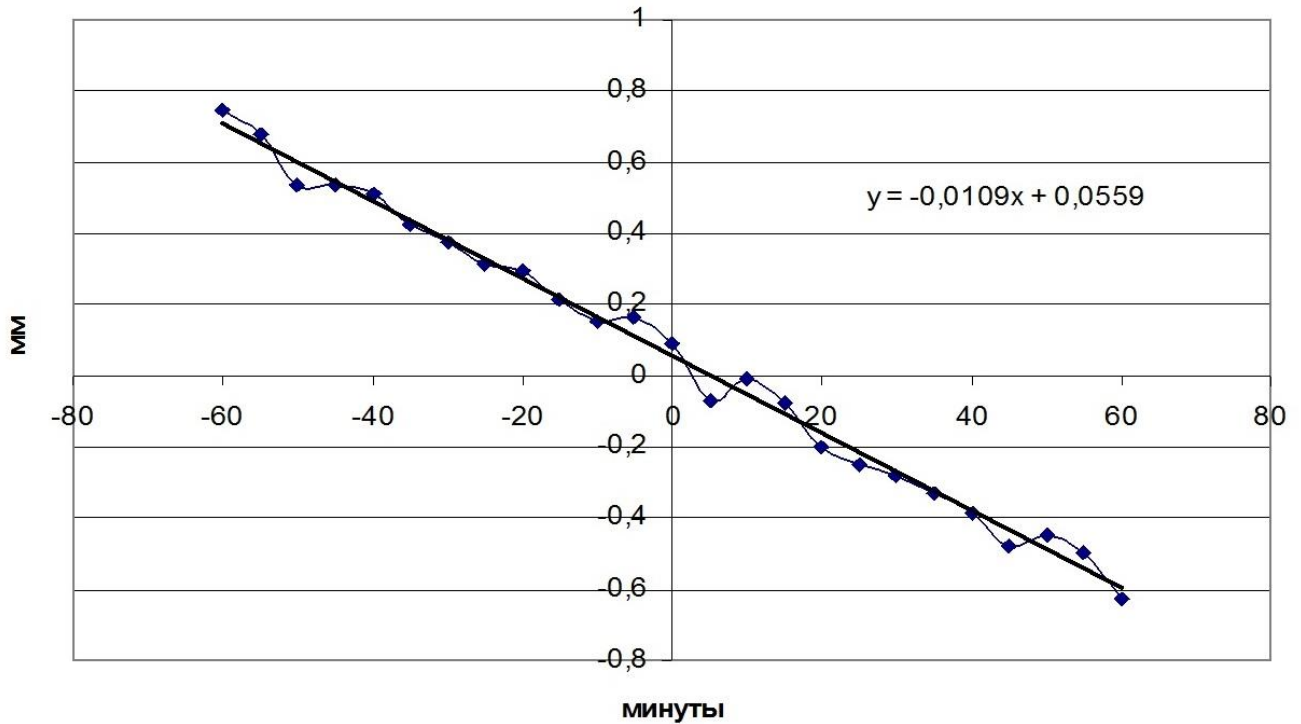


Рисунок 2.24 – График величины ошибки измерения превышений API Laser Tracker 3 при наклоне экзаменатора по оси Y

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

Анализ результатов исследований представленных на графиках рисунков 2.23, 2.24 показал, что прибор имеет систематическую ошибку по внутреннему электронному уровню (компенсатору) около 9"-10" по осям X, Y. 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 установки 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 в 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.

2.7 Разработка методики исследования точности измерений API Laser Tracker 3 на координатно-измерительной машине Contura G2

Одна из задач диссертационного исследования является определение точности и возможности работы прибора на малых расстояниях.

В качестве эталонного измерительного оборудования использовалась координатно-измерительная машина Contura G2. Предельно допустимая погрешность в соответствии с ISO10360 [86] линейного измерения при температуре окружающей среды от 18 °С до 22 °С составляет $1,9 \text{ мкм} + L/300$, где L – измеренная длина в миллиметрах. 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. Геодезические знаки

(рисунок 2.26) представляют собой подставки под 1,5 дюймовый отражатель для API Laser Tracker 3. 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. Лазерный трекер так же закреплялся на плите (рисунок 2.25).



Рисунок 2.25 – API Laser Tracker 3 закрепленный на плите

Всего было выполнено шесть станций трекера. Перед измерениями выполнены необходимые проверки и калибровки. Измерения проведены в двух режимах работы. В режиме интерферометра и в режиме абсолютного дальномера.



Рисунок 2.26 – Геодезические знаки, закрепленные на плите

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 координатно-измерительной машины вычисляются координаты центра сферы.

После этого отражатель перемещался на следующий геодезический знак, и процедура повторялась (рисунок 2.27). На все геодезические знаки отражатель устанавливался единообразно, нанесенным на бленде номером вверх.

В таблице 2.2 приведены средние значения результатов геодезических измерений со средней квадратической погрешностью (СКП) для Contura G2 из шести измерений.

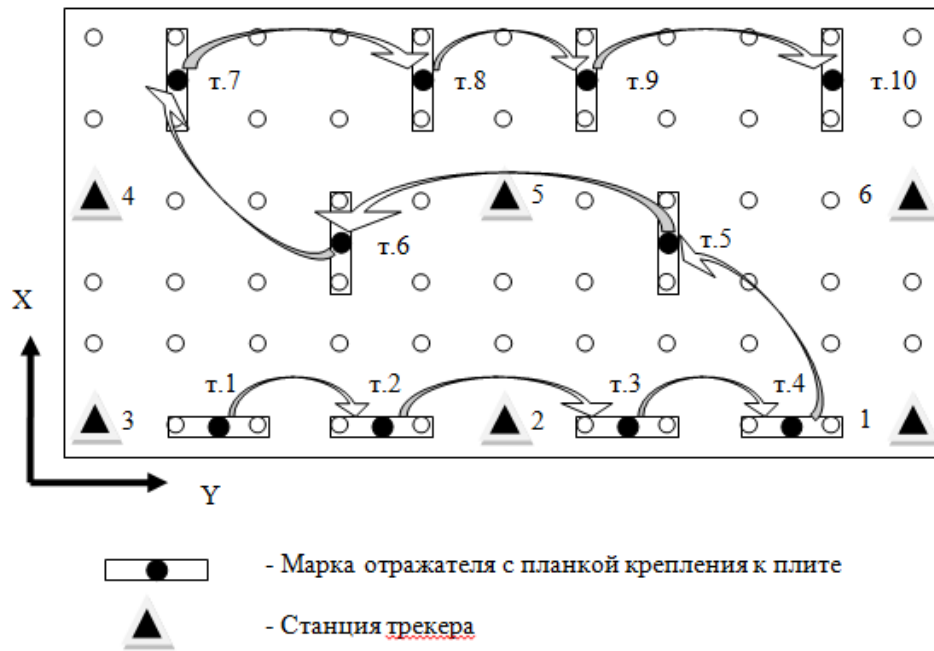


Рисунок 2.27 – Схема расположения оборудования

Таблица 2.2 – Средние значения результатов измерений координатно-измерительной машины Contura G2.

Номер точки	Среднее значение по оси X, мм	СКП по оси X, мм	Среднее значение по оси Y, мм	СКП по оси Y, мм	Среднее значение по оси 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 2.3 приведены средние значения результаты измерений API Laser Tracker 3. Прибор работал в режиме интерферометра (IFM). То есть луч лазера за все время проведения измерений ни разу не прерывался.

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

Номер точки	Среднее значение по оси X, мм	СКП по оси X, мм	Среднее значение по оси Y, мм	СКП по оси Y, мм	Среднее значение по оси 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 2.4 приведены средние значения результатов измерений API Laser Tracker 3. Прибор работал в режиме абсолютного дальномера (ADM).

Таблица 2.4 – Средние значения результатов измерений API Laser Tracker 3 в режиме ADM.

Номер точки	Среднее значение по оси X, мм	СКП по оси X, мм	Среднее значение по оси Y, мм	СКП по оси Y, мм	Среднее значение по оси Z, мм	СКП 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.

2.8 Разработка оснастки для работы с API Laser Tracker 3

Разработка конструкции площадки под цилиндрический уровень.

Для корректной работы API Laser Tracker 3 от горизонта была разработана конструкция площадки под цилиндрический уровень. Данная конструкция закрепляется в ручке API Laser Tracker 3 при помощи винтов. Винты

вкручиваются в стандартные резьбовые отверстия, расположенные на верхней поверхности ручки. Конструкция API Laser Tracker 3 не изменялась и не дорабатывалась, резьбовые отверстия в ручке существовали изначально. Центр масс площадки находится на оси вращения горизонтального круга. Так же имеется возможность юстировки для приведения площадки к уровню горизонта при помощи двух винтов. В качестве отсчетного устройства была использована 6' ампула уровня, что из проведенных исследований оказалось достаточно, для точной установки прибора относительно горизонтальной плоскости. При помощи юстировочных винтов, уровень был выведен в нулевое положение при разных направлениях измерительной головки. Для контроля использовался брусковый уровень с ценой деления 0,05 мм/м. В настоящее время эта конструкция успешно применяется для работы прибора относительно горизонтальной плоскости на установках ИЯФ СО РАН и полностью доказала свою эффективность.

Переходник для закрепления без штатива.

При выполнении работ на установках и комплексах ИЯФ СО РАН была отмечена ненадежность, а иногда и невозможность базирования API Laser Tracker 3 на стандартно поставляемый штатив. Стандартно поставляемый штатив представляет собой треногу с устройством для изменения высоты инструмента. Материал, из которого изготовлен штатив – дюраль. Штатив позволяет грубо устанавливать прибор относительно горизонтальной плоскости по закрепленному на нем круглому пузырьковому уровню. Величина регулировки прибора по высоте составляет 0,5 м.

Для работы на установках и комплексах ИЯФ СО РАН изготовлен специальный переходник (рисунок 2.28) в виде ответной части посадочного места API Laser Tracker 3 с плоским основанием для закрепления на ровной поверхности при помощи винтов M10.



Рисунок 2.28 – Специальный переходник для работы без штатива

При работе с переходником значительно выросла стабильность и повторяемость измерений. Так же выявлено и ряд особенностей:

- масса подставки относительно трекера должна быть в 2–3 раза больше;
- требуется обеспечить неподвижность подставки, так как прибор оснащен сервоприводами, которые постоянно корректируют положение измерительной головки наводя ее на центр шарика, что может приводить к самораскачиванию прибора.

Настенный геодезический знак под отражатель.

Для закрепления опорных сетей на установках и комплексах ИЯФ СО РАН разработана конструкция настенного геодезического знака (рисунок 2.29). В центральном отверстии геодезического знака помещается магнит, закрепленный на эпоксидной смоле, который удерживает сферу отражателя. Отражатель базируется на трех точках ребер геодезического знака, не касаясь магнита. Между магнитом и отражателем зазор 1 мм. Геодезический знак крепится на трех анкерных болтах.



Рисунок 2.29 – Настенный геодезический знак под отражатель для лазерного трекера конструкции ИЯФ

В настоящий момент на установках и комплексах ИЯФ используется более 300 знаков данной конструкции. Разработанная конструкция доказала свою эффективность при выполнении геодезических измерений в ИЯФ СО РАН.

По результатам представленных исследований можно сделать следующие выводы:

– перед тем как использовать современные координатно-измерительные системы для геодезического обеспечения контроля изготовления и юстировки технологического оборудования УНК необходимо провести их исследование. При работе с API Laser Tracker 3 рекомендуется произвести его модернизацию, так же требуется учитывать влияние прогрева на точность геодезических измерений. В целом точность работы API Laser Tracker 3 удовлетворяет требованиям точности изготовления и монтажа оборудования УНК;

– для осуществления геодезического контроля с помощью API Laser Tracker 3 необходимо разработать технологические схемы и методики, учитывающие его специфические особенности и возможности.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И УСТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЬНО- НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

3.1 Разработка методики нахождения геометрической оси магнитного элемента.

Паспортизация геодезических знаков на примере магнитных элементов комплекса ВЭПП-4м

До появления API Laser Tracker 3 в ИЯФ нахождение геометрического 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 измерений, магнитный элемент необходимо было устанавливать на поверочную плиту. 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 автором 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 используются две линзы (рисунок 3.3) с нужными физическими параметрами. Так как эти линзы раньше применялись для другой установки, на них была предусмотрена старая идеология установки в проектное положение (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 автором предложена методика нахождения механической оси линзы при помощи API Laser Tracker 3, рисунок 3.2.

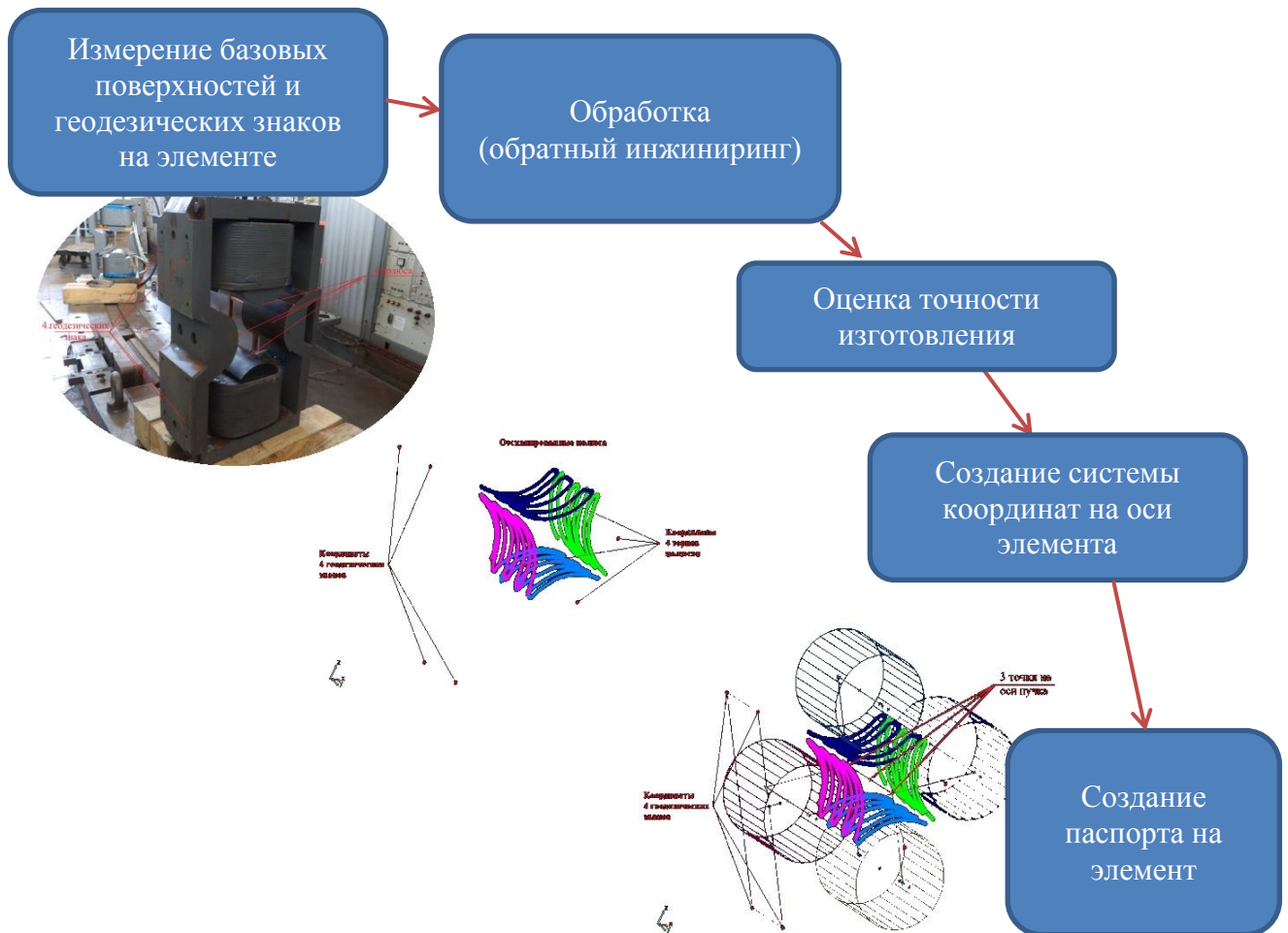


Рисунок 3.2 – Порядок действий для нахождения механической оси элемента

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.

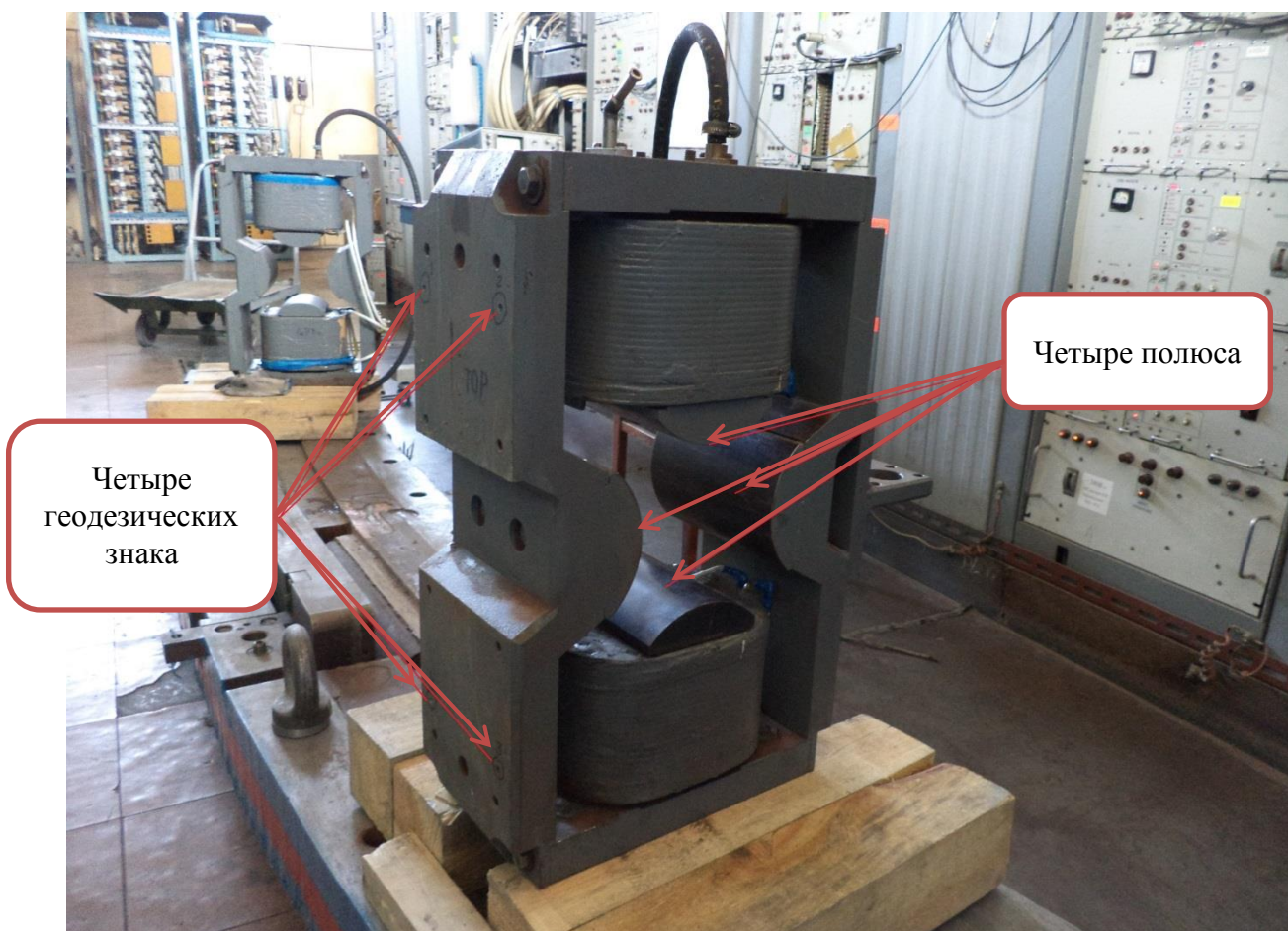


Рисунок 3.3 – Линза L1 для ВЭПП-4м

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 проведением 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

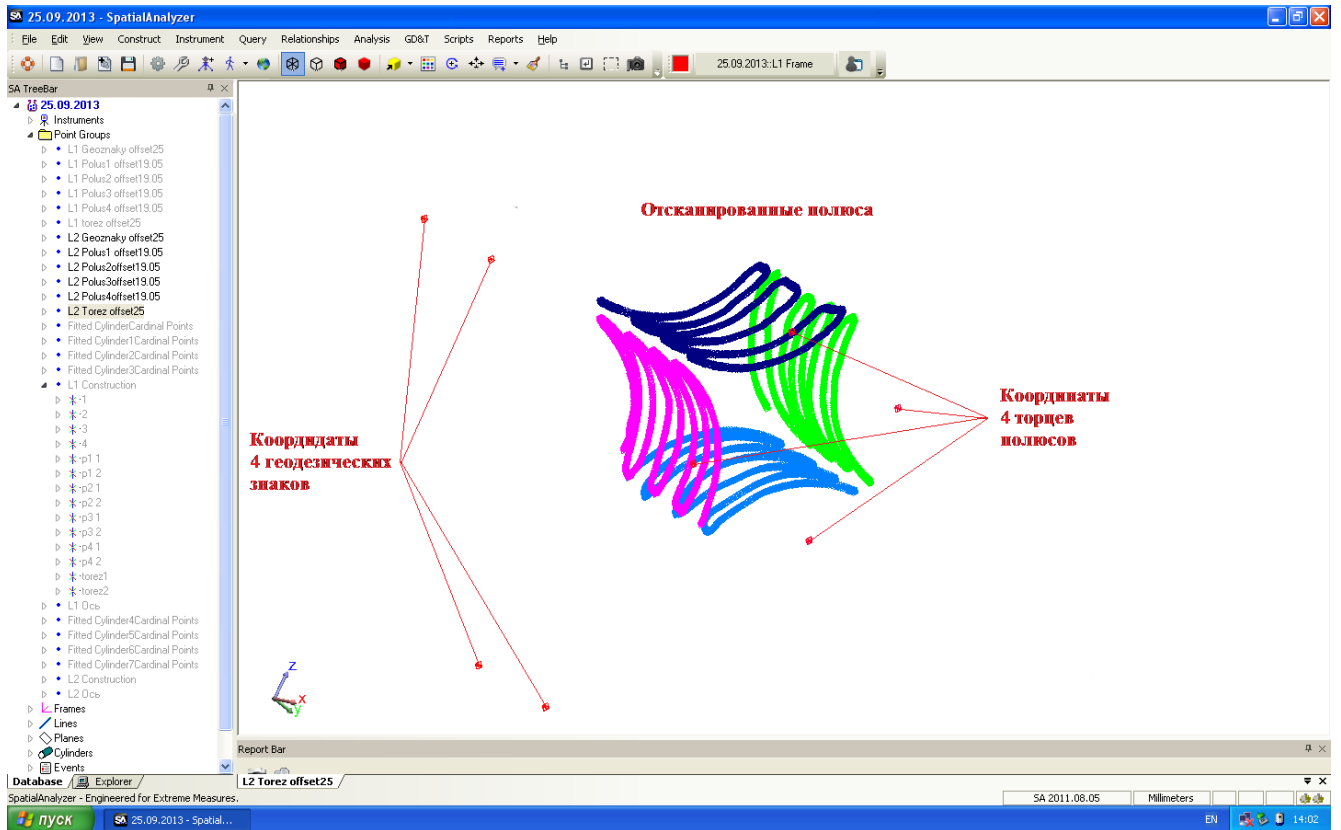


Рисунок 3.4 – Результаты измерений линзы L1

Для получения оси пучка в программном обеспечении Spatial Analyzer выполняется 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:

- Б_{левый полюс} = 0,011 мм, максимальное отклонение 0,040 мм по 658 точкам;
- Б_{правый полюс} = 0,014 мм, максимальное отклонение 0,048 мм по 722 точкам;
- Б_{верхний полюс} = 0,011 мм, максимальное отклонение 0,039 мм по 709 точкам;
- Б_{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 четырём 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 цилиндра 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, строятся 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

Наименование	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 продельвается на втором торце полюсов линзы. В результате применения разработанной методики имеется две точки на механической оси (вход в магнитный элемент и выход из магнитного элемента), по которым строится линия и находится 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.

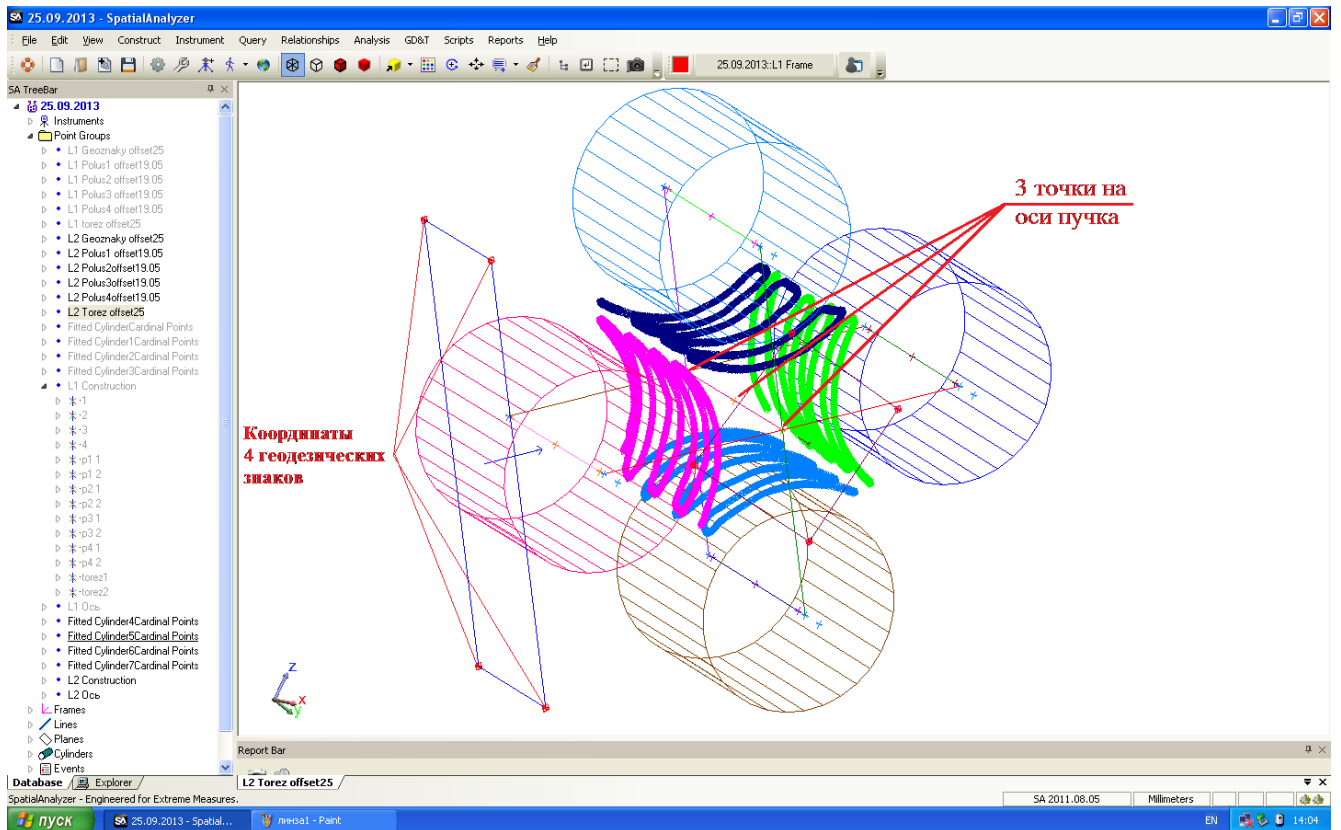


Рисунок 3.5 – Три точки на оси пучка частиц

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°) разворачивается система координат вокруг оси X на 45° в нужную сторону. После 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 нужным углом (45°). 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. Можно, выходя на установку, и ставить его физически от опорной сети комплекса.

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

3.2 Технологическая схема геодезического обеспечения при изготовлении дипольных магнитов для бустера NSLS-II

Цель данной технологической схемы 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 магнит) – в физике ускорителей, магнитный элемент, создающий однородное магнитное поле. Используется, в первую очередь, для создания ведущего поля, задающего 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: BF-фокусирующий магнит и BD-дефокусирующий магнит. На рисунках 3.6, 3.7 представлены модели BF фокусирующего и BD дефокусирующего магнита. Магниты имеют разные геометрические параметры.

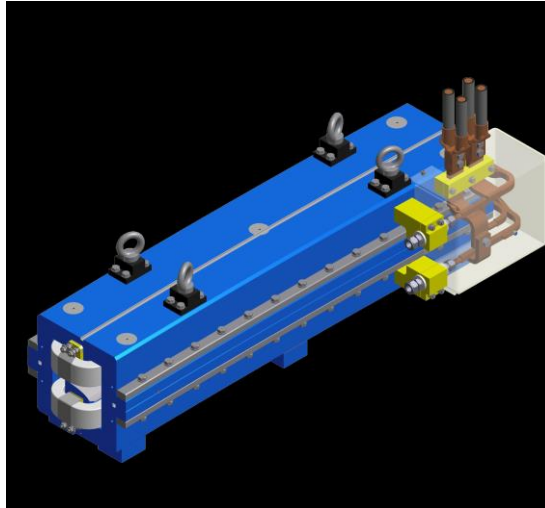


Рисунок 3.6 – BF фокусирующий магнит

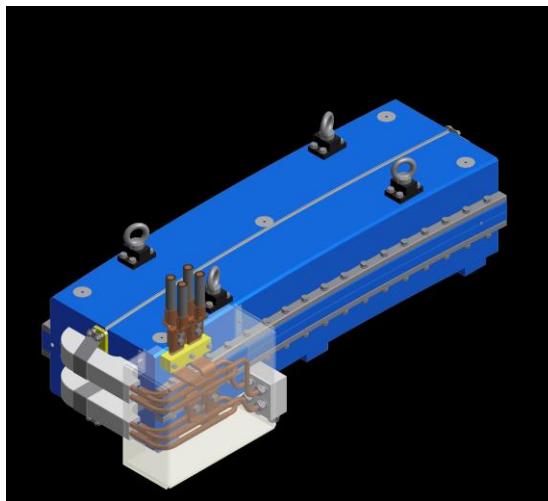


Рисунок 3.7 – BD дефокусирующий магнит

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 полутораймовый отражатель с подставкой для API Laser Tracker 3. По многочисленным измерениям геометрический центр отражателя определяется со средней квадратической погрешностью 0,001 мм. Согласно паспорту на отражатель отличие геометрического центра от оптического составляет от 0,002 до 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

Основная задача технологического процесса заключается в привязке магнитной оси дипольного магнита к 13 геодезическим знакам, расположенным на внешнем железе магнита. Для проведения измерений магнитного поля 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 каретки.

Способы геодезической привязки и устройство каретки.

На каретке (рисунок 3.9) 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 – Каретка с датчиками Холла и отражателями

Положение датчиков Холла определено при помощи микроскопа УИМ-23 [41] с привязкой к базовым поверхностям на медной пластине. 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 ($\delta = 0,002$ 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, рисунок 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 полутораградусный отражатель. Каретка располагается на одной высоте, с осью вращения вертикального круга API Laser Tracker 3. Выполнено 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 полутораградусного 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 имеется два набора данных:

– базовые поверхности и пять геодезических знаков на плите в системе координат каретки, измеренные координатно-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 Tracker3. Средняя квадратическая погрешность определения 0,007 мм.

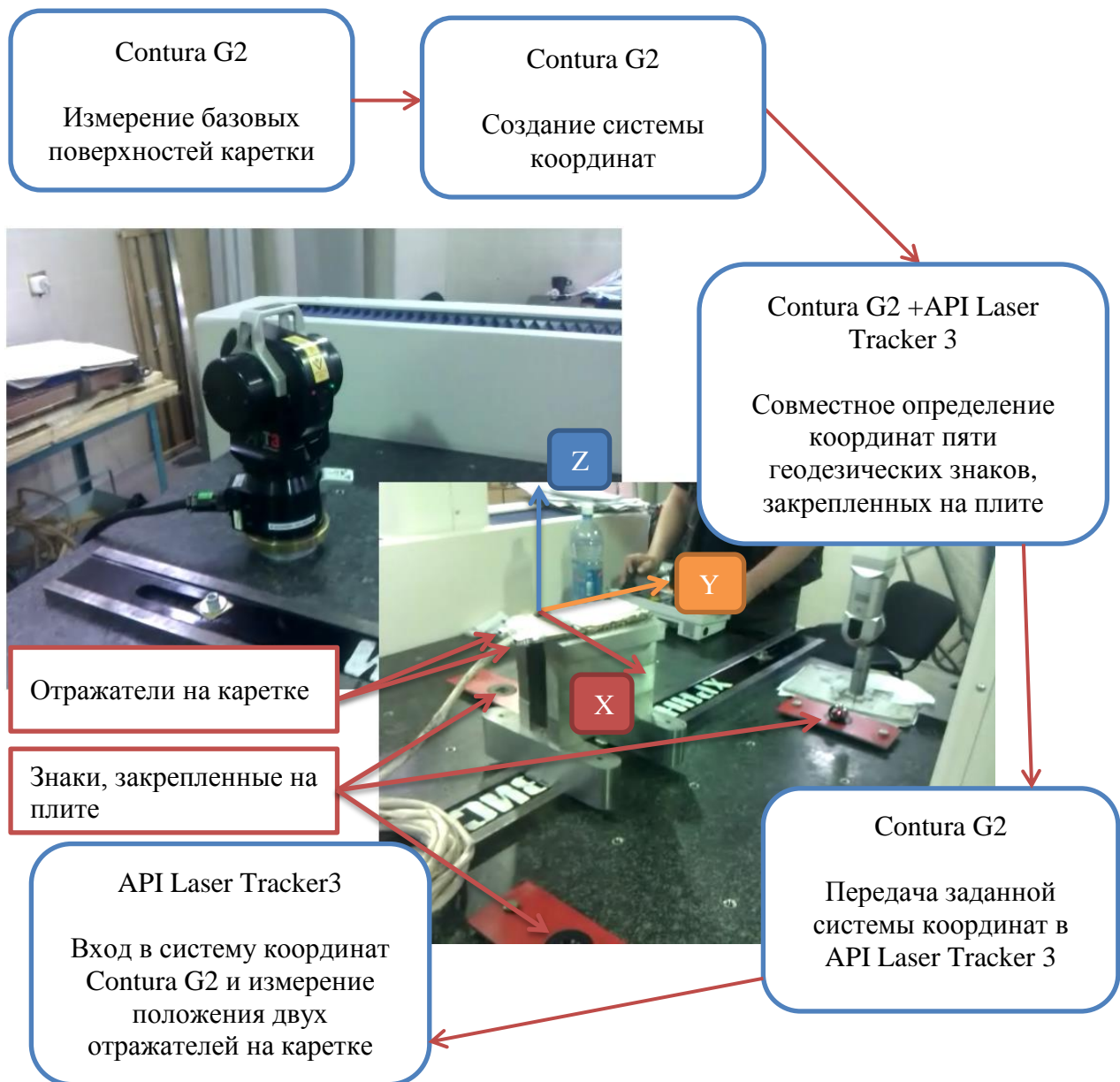


Рисунок 3.10 – Геодезическая привязка отражателей к системе координат каретки

Для пересчета координат центров отражателей закрепленных на каретке, пять геодезических знаков измеренных API Laser Tracker 3, накладываются на пять геодезических знаков 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.

Применения API Laser Tracker 3 на стенде магнитных измерений.

На стенде магнитных измерений установлена металлическая плита 4х6 м толщиной 300 мм. Плита установлена на резиновые опоры, чтобы ослабить влияние возможных вибраций. На плите смонтированы два гирдера на стандартных подставках (гирдер – жесткая несущая балка для группы магнитных элементов УНК). 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 (рисунок 3.11) предназначена для позиционирования каретки внутри магнита. Направляющая имеет 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 каретке находились в медианной плоскости магнита.

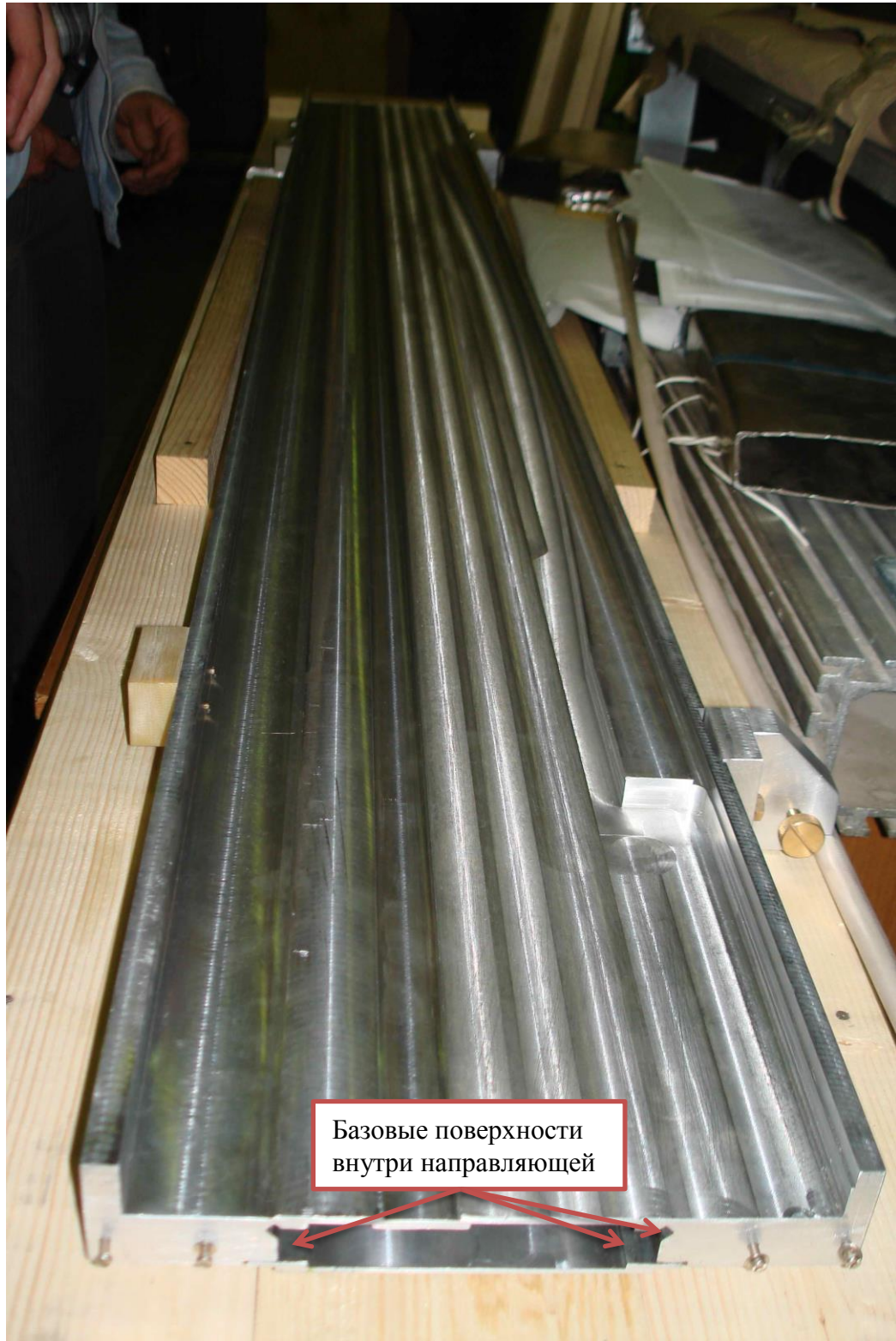


Рисунок 3.11 – Высокоточная направляющая

На рисунке 3.12 представлена каретка, расположенная внутри высокоточной направляющей.

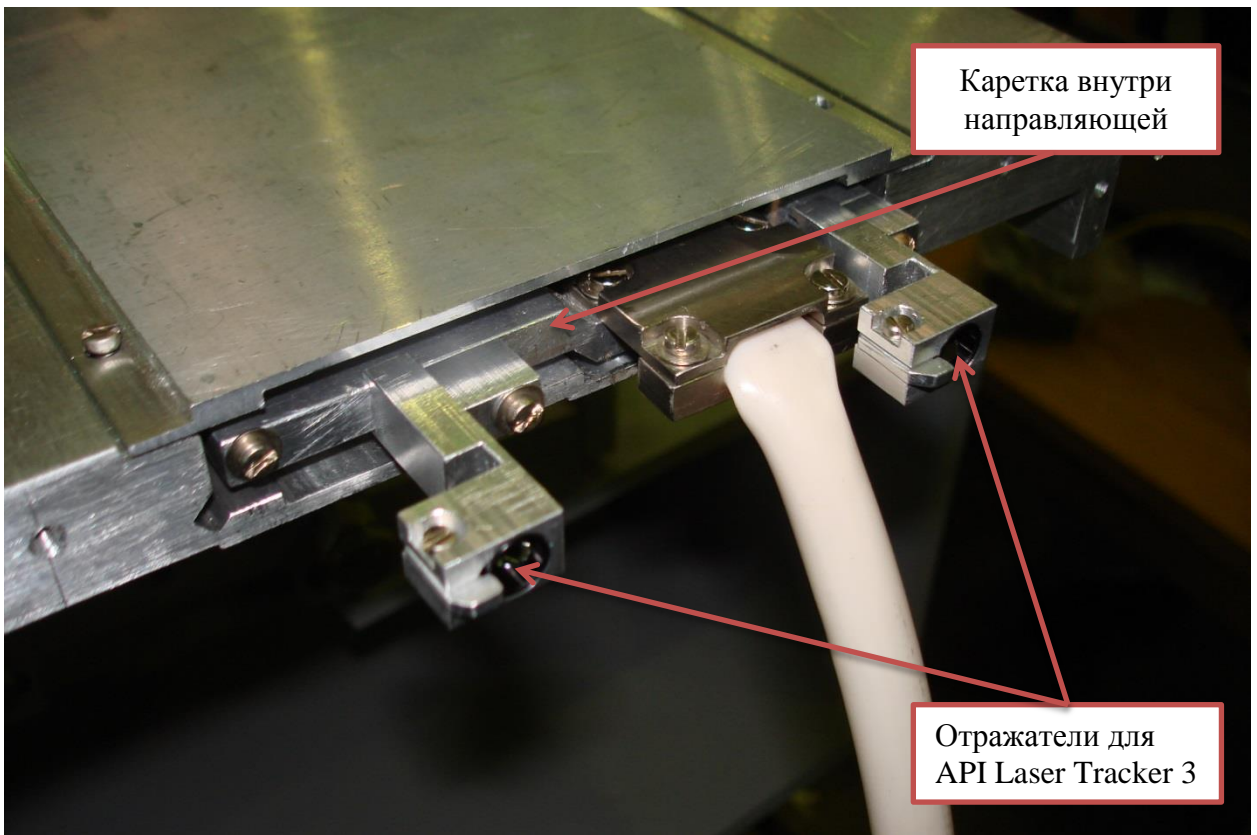


Рисунок 3.12 – Каретка внутри направляющей

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 помощи 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.



Рисунок 3.13 – Закрепление лазерного трекера на стенде магнитных измерений

Геодезические измерения для определения положения каретки внутри магнита.

Задача: необходимо определить координаты центров отражателей, закрепленных на каретке, относительно геодезических знаков на внешнем железе 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, выполняется 350 шагов, что составляет со всеми подготовками примерно около 40 минут. Затем каретка возвращается в исходное положение и измерения повторяются снова. Для каждого из отражателей с целью контроля выполняется 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. Если расхождение менее 0,04 мм, то делается вывод, что трекер и измеряемый магнит относительно друг друга не изменили своего положения. 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.

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 получают координаты центров отражателей, расположенных на каретке в локальной системе координат данного магнита. Результат определения координат центров отражателей, расположенных на каретке и информация о положении датчиков Холла относительно отражателей, закрепленных на каретке, передается физикам для введения поправки за 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.

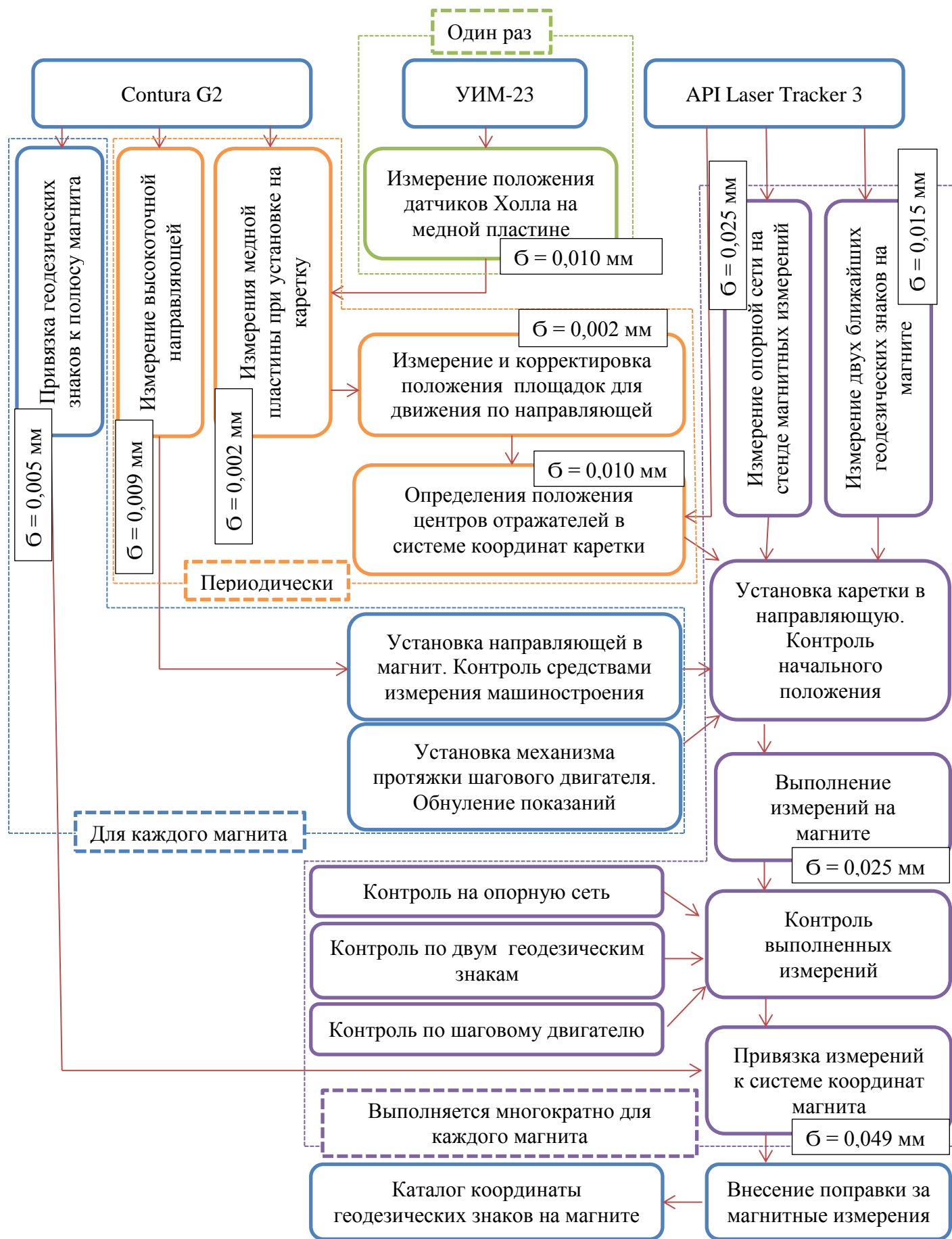


Рисунок 3.14 – Блок-схема контроля изготовления магнитов

После пересчета с учетом поправки на магнитные измерения создается 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 определено, 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.

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

Одной из задач диссертационного исследования является определение положения геодезических знаков на внешнем железе относительно магнитной оси элемента при помощи API Laser Tracker 3.

Квадрупольная (рисунок 3.15) и секступольная (рисунок 3.16) линза – это магнитный элемент, для фокусировки пучков заряженных частиц с помощью магнитного поля квадрупольной и секступольной конфигурации.

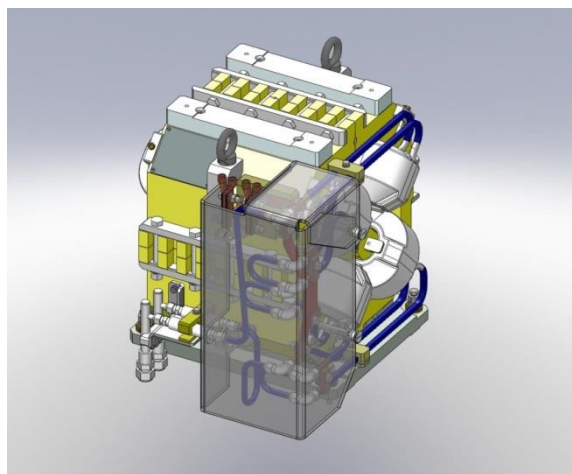


Рисунок 3.15 – Квадрупольная линза

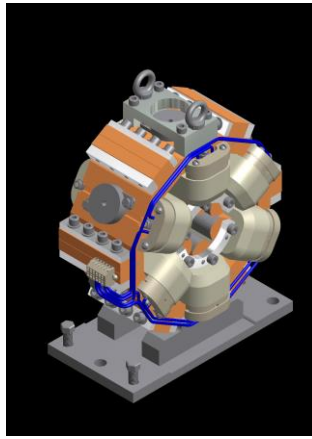


Рисунок 3.16 – Секступольная линза

Для кольца бустера NSLS-II используются два типа фокусирующих линз – это квадруполь и секступоль. 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.



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

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 базовой поверхности стапеля в специальных направляющих 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 отметить, что 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 выполнении 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 линза сама крепится к подставке. Геодезические знаки так же представляют собой отверстия диаметром $6,35^{+0,02}$ 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 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 выполнения измерений магнитный элемент снимается со стапеля. Так же со стапеля снимается шаговый двигатель с угломером и катушка с датчиками Холла. Вместо катушки устанавливается 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). Определяется ось оптимального цилиндра, которая так же является и осью катушки в системе координат стапеля. По измерениям на торцевые точки 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 изготовлены все дипольные и секступольные линзы для бустера NSLS-II.

3.4 Назначение ускорительно-накопительного комплекса ВЭПП-2000

ВЭПП-2000 – электрон-позитронный коллайдер, построенный в институте ядерной физики СО РАН. Установка создавалась для изучения физики легких мезонов, а также для прецизионных измерений сечения аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны. Точное измерение этого сечения очень важно для вычисления аномального магнитного момента мюона. Сравнение теоретического и экспериментального значений аномального магнитного момента мюона – это один из наиболее чувствительных к “новой” физике методов. Энергия сталкивающихся частиц составляет 2 ГэВ в системе центра масс, что достаточно для рождения пары нуклон-антинуклон и позволит, в частности, измерить формфактор нейтрона.

Ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-2000 (рисунок 3.18) состоит из нескольких накопительных колец, с помощью которых энергия пучка частиц повышается с 2,3 МэВ в импульсном линейном ускорителе (ИЛУ) до 2 ГэВ в основном кольце ВЭПП-2000.

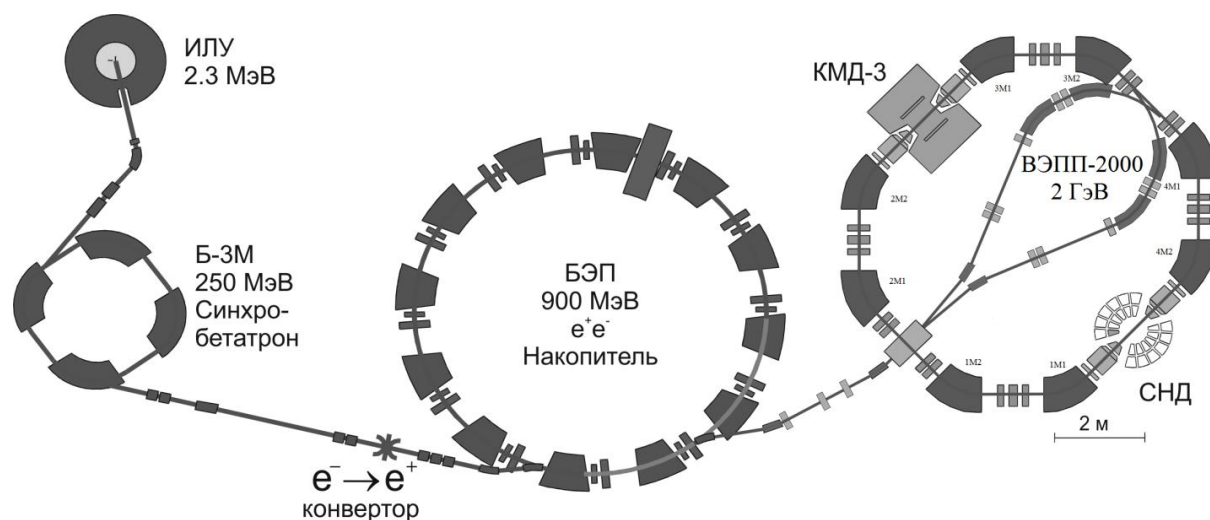


Рисунок 3.18 – Схема комплекса ВЭПП-2000

На ускорителе работают два детектора элементарных частиц: СНД и КМД-3. Одной из принципиальных особенностей является реализация на этой машине концепции круглых пучков, которая, как предполагается, позволит отодвинуть порог по эффектам встречи в сторону увеличения циркулирующих токов и за счёт этого повысить светимость установки. Проектная светимость $L = 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на энергии 1 ГэВ в пучке [8, 10].

Проектные допуски на выставку магнитных элементов ускорительного комплекса ВЭПП-2000:

Дипольные магниты:

по вертикали $\pm 0,1$ мм;

в плане $\pm 0,5$ мм;

наклон $\pm 0,1$ мрад.

Дуплеты и триплеты квадрупольных линз:

соосность $\pm 0,05$ мм;

по вертикали $\pm 0,1$ мм;

по радиусу $\pm 0,1$ мм;

по касательной $\pm 0,5$ мм;

наклон $\pm 0,2$ мрад.

На остальные элементы допуски грубее.

Монтаж комплекса был начат в 2001 году. Автор диссертации выполнял весь комплекс геодезических работ по обеспечению монтажа, изготовлению и компарированию инструментария, паспортизации магнитных элементов, а также последующей высокоточной юстировки и обслуживания УНК ВЭПП-2000.

Большинство геодезических знаков на комплексе ВЭПП-2000 представляют собой отверстия диаметром 25,4 мм (рисунок 3.19). Это сделано для использования инструментария применяемого на других установках и комплексах ИЯФ СО РАН.

Положение всех геодезических знаков на элементах измерено и паспортизировано. Перед сборкой комплекса все элементы поочередно установлены на гранитную плиту и с помощью механических средств измерения (индикаторы часового типа, микрометры, концевые плоскопараллельные пластины 1 кл.) измерено положение геодезических знаков относительно полюсов магнитных элементов. Получены координаты в локальных системах координат магнитных элементов. Из локальной системы координат выполнен пересчет в систему координат ВЭПП-2000.

За начало системы координат принят физический центр ускорительного комплекса ВЭПП-2000, который закреплен на местности металлическим столбом диаметром 400 мм. В начале монтажа на этом столбе установлен геодезический знак. Центр знака определял начало системы координат на комплексе. Второй такой же знак был установлен по направлению впуска на консоли, закрепленной на стене здания и служил для ориентации системы координат. Оба знака установлены выше орбиты пучка на 270 мм в плоскости геодезических знаков большинства элементов комплекса. Требовалось это для того, чтобы выполнять измерения в одной плоскости. Так как установка имеет два этажа в высоту, а магнитные элементы расположены на втором этаже, высота столба составляет около 5 м. Изначально установка элементов проводилась высокоточным уровнем динамостатом (ВУД), что подразумевает боковую нагрузку при натяжении ленты. Практика работы показала, что верх столба под нагрузкой 15 кг

может отклоняться от 0,25 до 0,3 мм, что неприемлемо. Было принято решение повысить жесткость конструкции, добавив внутрь трубы бетон с арматурой диаметром 36мм. Так же укреплено основание (крепление трубы к фундаменту) заливкой бетона в установленную опалубку диаметром 700 мм высотой 1 м с арматурой диаметром 36 мм по кругу. Это привело к тому, что верх трубы под нагрузкой 15 кг имеет отклонение менее 0,05 мм.

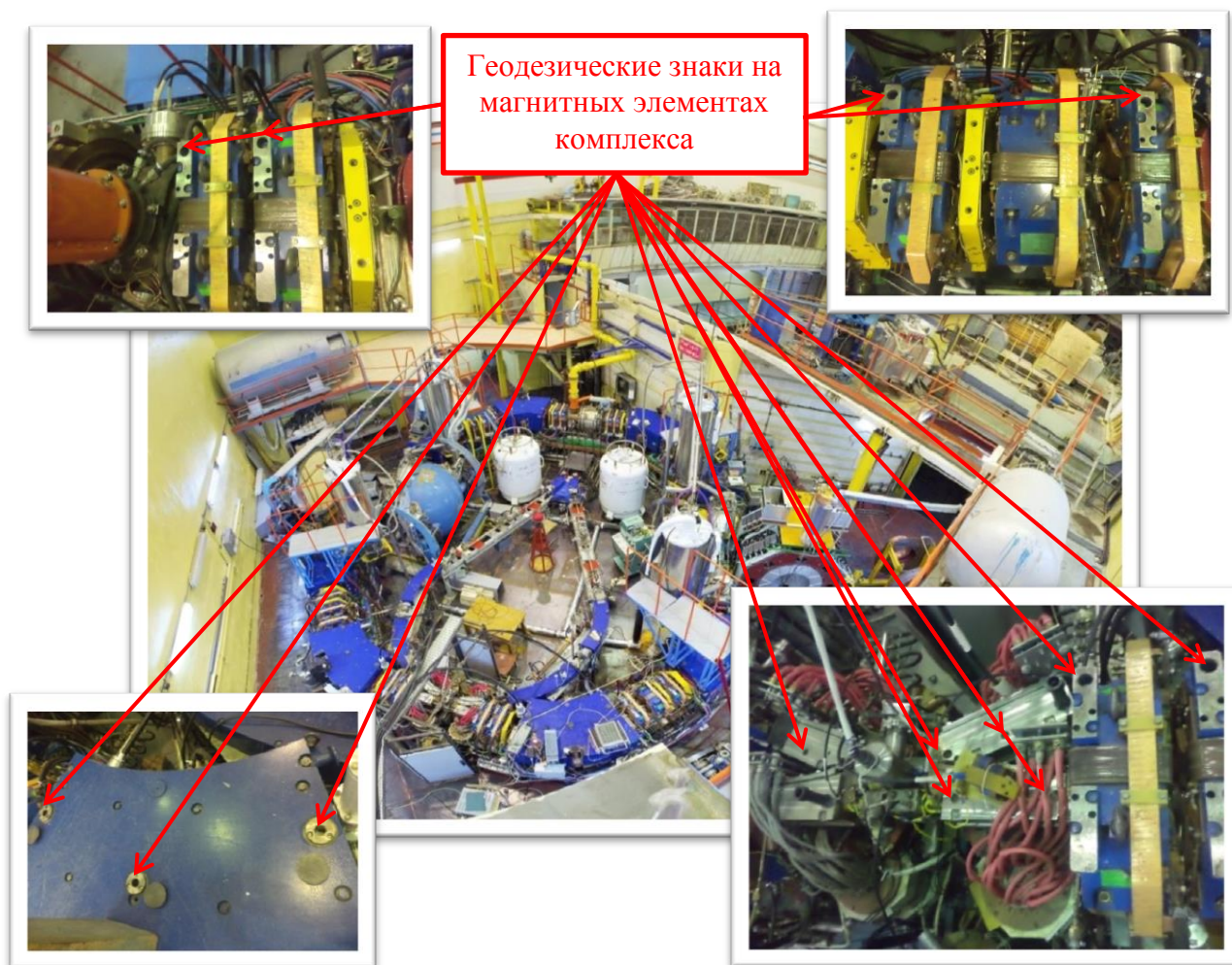


Рисунок 3.19 – Размещение геодезических знаков на магнитных элементах ускорительного комплекса ВЭПП-2000

От двух знаков линейными засечками предварительно расставлены все элементы. Предварительная расстановка элементов требуется для сборки вакуумной камеры (чтобы установить вакуумную камеру требуется разборка элемента уже установленного на кольце) и для последующей точной установки

(чтобы минимизировать подвижки элементов после сварки вакуумной камеры).
Методика установки представлена в виде блок-схемы на рисунке 3.20.



Рисунок 3.20 – Устаревшая методика установки комплекса ВЭПП-2000 в проектное положение

Точная установка всего оборудования комплекса в проектное положение выполнена при помощи нивелира Ni007, высокоточного уровенного динамостата (ВУД) и набора инварных жезлов с микрометрами. ВУД и инварные жезлы предварительно были откалиброваны на компараторе ИЯФ СО РАН интерферометром Hewlett-Packard 5529А.

Пример плановой исполнительной съемки, по основным магнитам кольца выполненной в ноябре 2003 года, представлен на рисунке 3.21. Измерены расстояния от двух опорных геодезических знаков и расстояния между соседними магнитами.

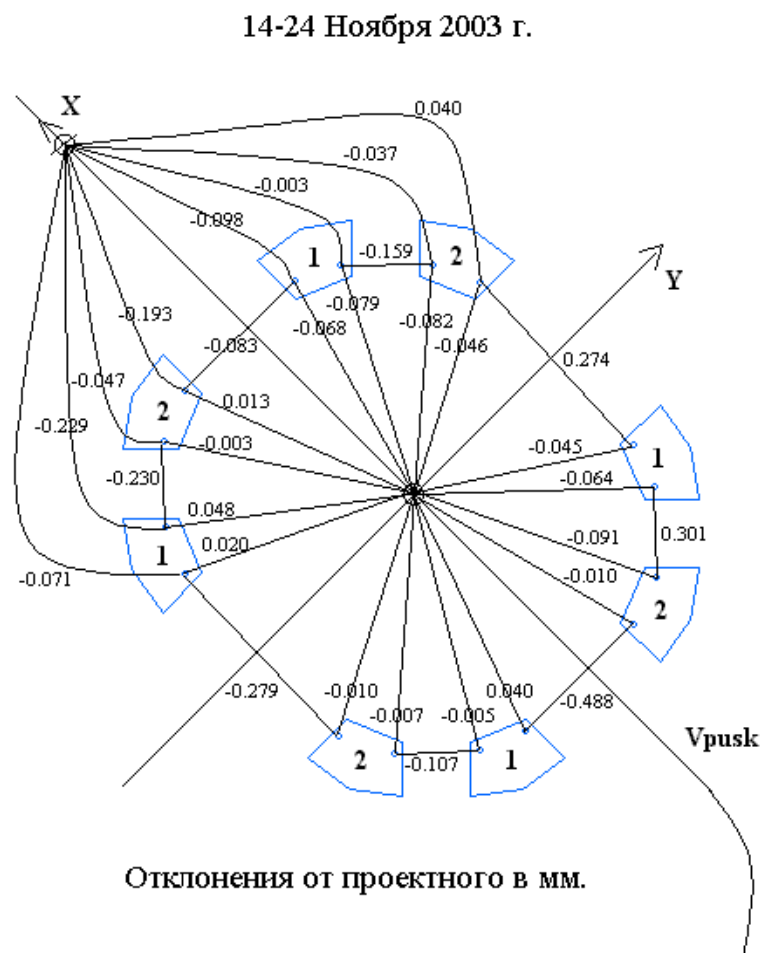


Рисунок 3.21 – Плановая исполнительная съемка после установки основных магнитных элементов в проектное положение

С целью повышения эффективности, возникла задача по разработке новой методики геодезического обеспечения, основанной на применении лазерного трекера. Такая методика была успешно разработана автором.

3.5 Разработка методики геодезического обеспечения периодической высокоточной юстировки магнитных элементов ВЭПП-2000.

Для периодической юстировки комплекса ВЭПП-2000 (рисунок 3.22) создан каталог координат в программном обеспечении Spatial Analyzer. В него внесены координаты элементов комплекса, для которых требуется точная установка. Важно отметить, что координаты внесены с учетом оснастки (offset) лазерного трекера, то есть закоординированы точки, которые лежат над поверхностью магнита на высоте 25,4 мм (использован дюймовый набор оснастки). Для измерений лазерным трекером на стенах зала комплекса ВЭПП-2000 закреплены восемь настенных геодезических знаков под отражатель (приведенные в 2.8). Центральный знак комплекса ВЭПП-2000 демонтирован, так как вместо него устанавливается лазерный трекер на магнитную подставку. Знаки на стенах закреплены с тем расчетом, чтобы обеспечить их видимость с одной центральной станции лазерного трекера.

На данный момент для установки комплекса в проектное положение используется API Laser Tracker 3 и нивелир Ni007. Согласно, новой методики (рисунок 3.24) для установки всего оборудования требуется выполнить измерения на девяти станциях API Laser Tracker 3 и пяти станциях нивелиром. Для выбора плоскости относимости из центра проводятся измерения превышений всех видимых геодезических знаков на дипольных магнитах. Критерием выбора оптимальной плоскости является минимизация подвижек для большинства дипольных магнитов. На эту отметку устанавливаются все дипольные магниты. Для установки магнитов 1M1, 2M2, 3M1, 4M2 выполняются остальные четыре станции нивелиром, так как часть геодезических знаков на них не видна из центра. Выполнить эти операции трекером для комплекса ВЭПП-2000

невозможно, потому, что плановые и высотные знаки на комплексе разнесены и имеют разную конструкцию. Для высотных знаков изначально изготовлена специальная оснастка, которая позволяла измерять точки скрытые в железе дипольных магнитов. Оснастка разработана под нивелир Ni007. Заменить ее трекером оказалось проблематично, поэтому был оставлен нивелир.

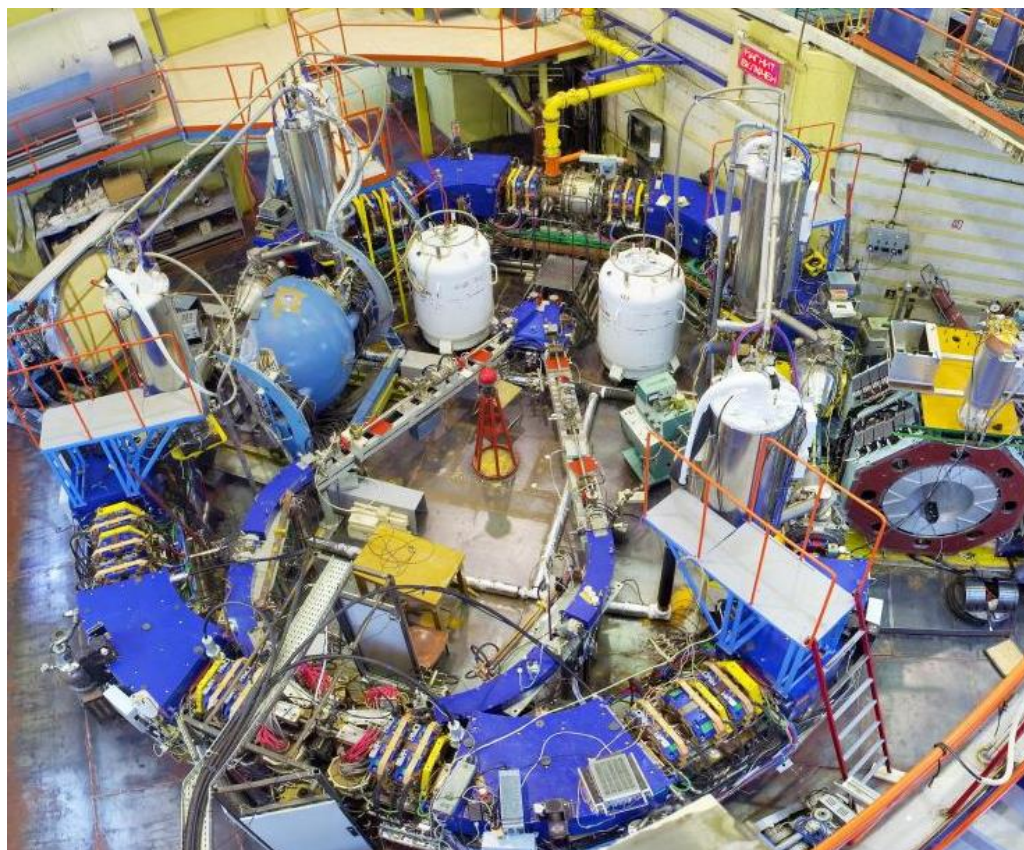


Рисунок 3.22 – Общий вид комплекса ВЭПП-2000

После установки всех дипольных магнитов на одну отметку, лазерным трекером выполняются измерения на первой станции в центре комплекса (см схему станций трекера на комплексе, рисунок 3.23). Стоит отметить, что после прогрева трекера нужно выполнить 20 минутный дополнительный прогрев и только после этого начинать выполнять калибровки и измерения. Все измерения и юстировку элементов по возможности выполнять в максимально короткий промежуток времени. Подробная информация о дополнительном прогреве приведена в 2.4. Для использования данной методики на других установках, без

использования нивелира, API Laser Tracker 3 должен быть установлен по уровню. Особенности приведения прибора описаны в 2.6.

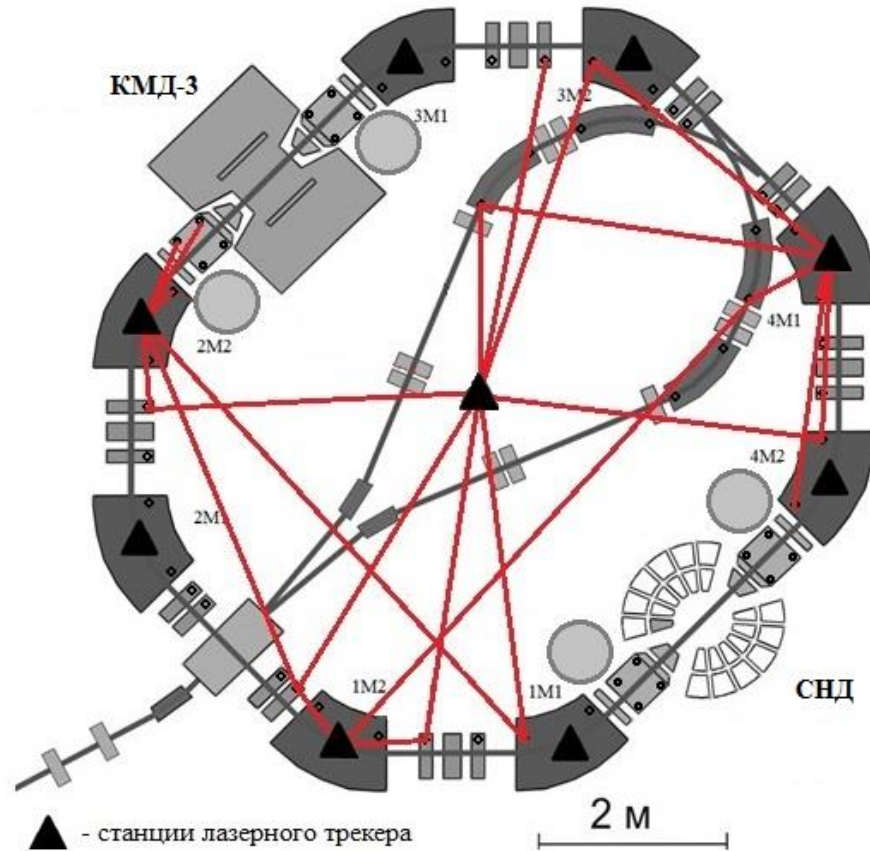


Рисунок 3.23 – Схема станций трекера на комплексе ВЭПП-2000

С первой станции API Laser Tracker 3 определяется пространственное положение всех видимых геодезических знаков на элементах и всех знаков опорной сети ускорительного комплекса. По результатам измерений определяются координаты геодезических знаков в локальной системе координат API Laser Tracker 3. Определенные в ходе измерений координаты геодезических знаков на элементах комплекса накладываются на проектные координаты геодезических знаков каталога координат, так чтобы сумма квадратов отклонений была минимальна. После этого станция прибора и все выполненные измерения пересчитываются (привязываются) в проектную систему координат. Средняя квадратическая погрешность привязки определенных координат к проектным координатам зависит от величины реализовавшихся деформаций на комплексе

ВЭПП-2000 и может составлять несколько десятых долей миллиметра в год. Как оказалось, после нескольких лет эксплуатации, опорная сеть имеет деформации сопоставимые или большие чем смещение магнитных элементов. Возможно, это объясняется тем, что комплекс собран на единой плите, развязанной со стенами здания, на которых закреплены опорные знаки сети. Так же из-за конструктивных особенностей два опорных знака закреплены на фальшстене, что тоже вносит свой вклад в величину деформации опорной сети. Поэтому в настоящий момент опорные геодезические знаки используются как переходные точки для привязки станций API Laser Tracker 3 и для ориентирования и оценки смещения комплекса как целого. После выполнения привязки в Spatial Analyzer устанавливается режим показывающий отклонение от проектных величин. Магнитные элементы комплекса при помощи юстировочных винтов устанавливаются в проектное положение согласно данным каталога проектных координат. Так же с этой станции необходимо установить четыре триплета и четыре дуплета квадрупольных линз, так как они имеют высокие требования на точность установки. После установки всех элементов с первой станции, производится исполнительная съемка. Следующие четыре станции выполняются на дипольных магнитах 1M2, 2M1, 3M2, 4M1, с них устанавливаются оставшиеся четыре дипольных магнита знаки которых не видны из центра. После установки этих магнитов выполняется исполнительная съемка, как самих дипольных магнитов, так и близлежащих элементов комплекса. Максимальная средняя квадратическая погрешность определения положения геодезических знаков на магнитных элементах ВЭПП-2000 с любой точки комплекса 0,07 мм, получена по результатам многочисленных измерений API Laser Tracker 3. Для привязки последующих станций используются результаты исполнительной съемки первой станции. Так же с этих станции будет видна часть впускного канала подводящего пучок к комплексу. Последние четыре станции нужны для выставки четырех сверхпроводящих соленоидов.

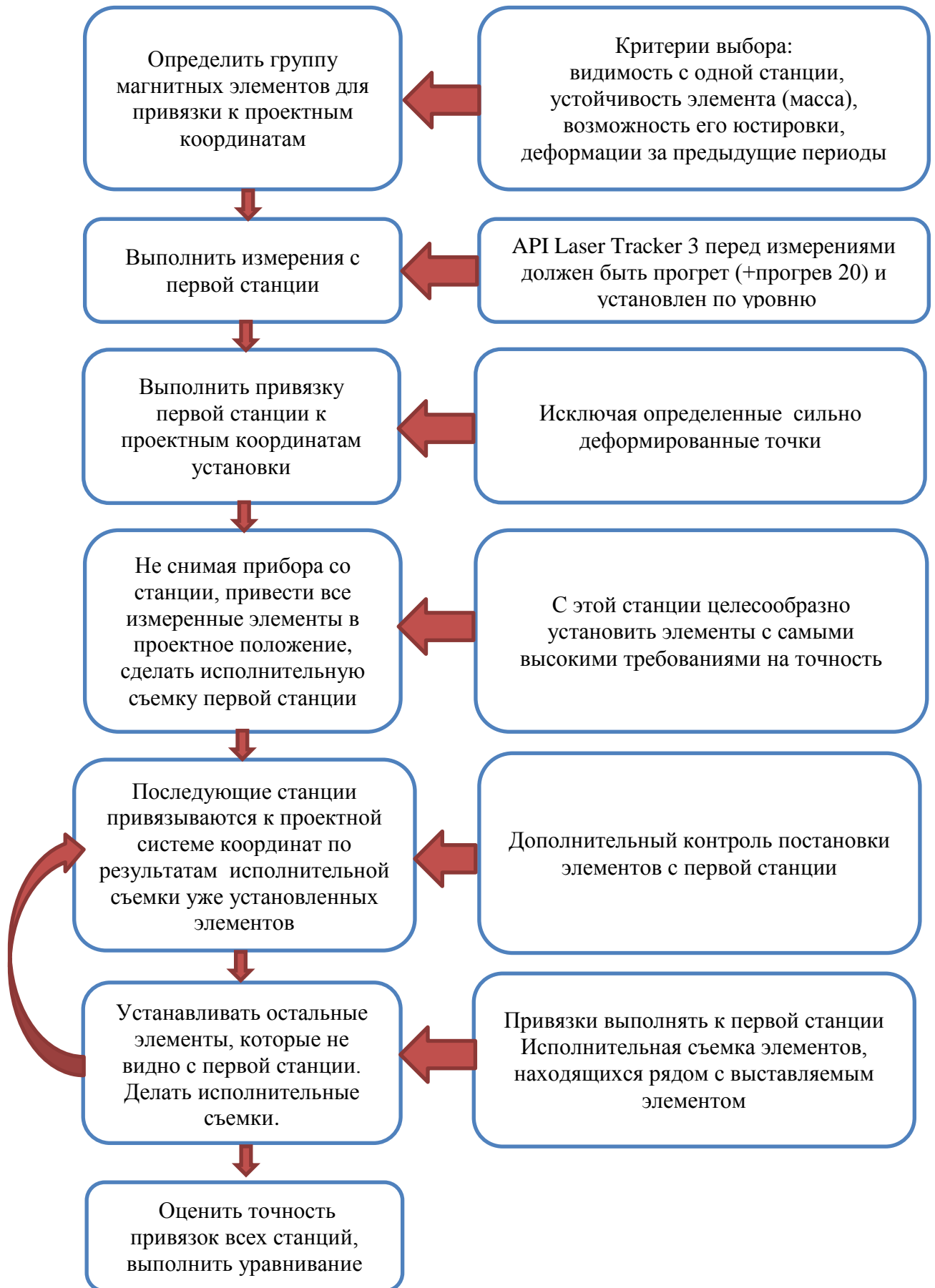


Рисунок 3.24 – Предлагаемая автором методика периодической установки комплексов подобных ВЭП-2000 в проектное положение

Привязка так же осуществляется на уже установленные элементы, по возможности на элементы установленные с первой станции. Порядок исполнительной съемки тот же, что и для всех станций после первой. Выполняется съемка установленного элемента и всех связанных с ним элементов. Общая средняя квадратическая погрешность уравненных координат всех магнитных элементов относительно проектных координат не должна превышать 0,2 мм.

В приложении А приводится пример исполнительной съемки выполненной при помощи API Laser Tracker 3.

Разработанная методика с использованием API Laser Tracker 3 позволила значительно увеличить скорость проведения работ, повысить точность и сократить время простоя комплекса с 10-15 до 3-4 дней. Данная методика подходит как для периодической выставки всего комплекса, так и для выставки его отдельных частей после разборки или ремонта. Наблюдается “контролируемый дрейф” комплекса как целого. Величина дрейфа оценивается от 0,1 до 0,2 мм в год, что тоже возможно периодически (раз в несколько лет) корректировать привязывая комплекс ВЭПП-2000 к комплексу БЭП с которого поступает пучок частиц.

3.6 Расчет обобщенных временных затрат

С появлением API Laser Tracker 3 временные затраты на выполнение геодезических работ на ускорительных комплексах существенно уменьшились.

Общие временные затраты складываются из затрат времени на измерение и затрат времени на обработку этих измерений. Это можно представить в виде формулы

$$T_{\text{общие}} = T_{\text{измерение}} + T_{\text{обработка}} \cdot \quad (3.1)$$

В свою очередь время измерений можно разделить на прогрев, калибровку и непосредственно измерения. Запишем это следующей формулой

$$T_{\text{измерения}} = T_{\text{заводской прогрев}} + T_{\text{20 мин прогрев}} + T_{\text{калибровка}} + T_{\text{цикл измерений}} \cdot \quad (3.2)$$

Время заводского прогрева зависит от внешней температуры окружающего воздуха и может колебаться от 20 до 40 минут. Автор диссертации на основании проведенных исследований рекомендует добавить к заводскому прогреву еще 20 минутный прогрев, это позволит избежать лишних и ненужных калибровок прибора, а обойтись только быстрыми проверками. Следующие временные затраты приходятся на быстрые проверки и калибровки прибора, примерно от 5 мин до 2-3 ч в зависимости от того, прошел ли прибор быстрые проверки, либо ему требуется полная калибровка.

Время на проведение калибровки так же можно представить в виде формулы

$$T_{\text{калибровка}} = T_{\text{быстрая проверка ADM}} + T_{\text{быстрая угловая проверка, калибровка}} \cdot \quad (3.3)$$

Если проверки прибора, приведенные в формуле (3.3) пройдены успешно, полученные величины не выходят за предельные допуски, дальнейшие калибровки не требуются, в противном случае время на проведение калибровки можно представить следующей формулой

$$T_{\text{калибровка}} = T_{\text{быстрая проверка ADM}} + T_{\text{быстрая угловая проверка, калибровка}} + T_{\text{калибровка ADM}} + T_{\text{полная угловая калибровка}} + T_{\text{калибровка "домашней точки"}} \cdot \quad (3.4)$$

Выполнение полных калибровок по формуле (3.4) может потребоваться после длительной транспортировки прибора, сильных перепадах температуры окружающей среды, сильных сотрясениях, ударах кейса с измерительной головкой.

И наконец, основные затраты времени приходятся на цикл измерений, которые, так же можно описать формулой

$$T_{\text{цикл измерений}} = N_{\text{станций}} \cdot \{T_{\text{координаты}}; T_{\text{сканирование}}; T_{\text{установки}}; \text{и т. д.}\} . \quad (3.5)$$

Количество станций обусловлено видимостью тех или иных объектов, поверхностей, геодезических знаков. Проводимые на каждой станции измерения, такие как определение координат геодезических знаков, сканирование плоскостей (поверхностей), установка в проектное положение магнитных элементов и другие виды работ могут занимать достаточно продолжительное время (весь рабочий день и более).

Так же немаловажным этапом по времени является обработка полученной информации. Различные построения, нахождения поверхностей, плоскостей, центров окружностей, реконструкция орбиты пучка частиц в магнитном элементе, создание новых систем координат и т. д. И, как завершающая стадия, создание отчета о проделанной работе, с построением 3D моделей элементов технологического оборудования, оценкой точности и созданием каталогов координат ускорительного комплекса (элемента).

В качестве вывода, отметим:

- технологическая схема контроля изготовления магнитных элементов представленная на рисунке 3.14 и методика высокоточной юстировки оборудования на примере комплекса ВЭПП-2000 (рисунок 3.24) подтвердили свою эффективность и успешно используются для развития УНК в ИЯФ СО РАН и при выполнении зарубежных контрактов.

- полный комплекс работ на ускорительных комплексах включает в себя не только проведение измерений на этапе изготовления, монтажа и эксплуатации оборудования, но и разработку специального программного обеспечения для сбора, анализа, обработки результатов измерений, построения 3-D моделей и прогнозирования возможных осадок и деформаций.

4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ И ВНЕДРЕНИЕ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ

4.1 Алгоритм и программа для уравнивания плановой опорной сети комплекса ВЭПП-4м

Для обработки результатов измерений плановой опорной геодезической сети комплекса ВЭПП-4м автором разработаны алгоритм и реализован в программе “Уравнивание плановой опорной сети ВЭПП-4м”. Программа написана на языке программирования Visual Basic для операционной системы Windows. Прототипом данной программы послужил алгоритм и софт, разработанный Левашовым Ю. И. для системы “ОДРА” [28]. В качестве главных достоинств и отличий предлагаемого программного продукта можно отметить следующее:

- выполнить обработку результатов стандартными программами для уравнивания невозможно;
 - с учетом многолетнего геодезического мониторинга изменены исходные опорные пункты;
 - результат обработки представляется в графическом виде, разработан специальный модуль для 3D визуализации деформаций тоннеля ускорителя;
 - программа написана на современном языке программирования;
 - возможность использования любых персональных компьютеров с операционной системой Windows (система ОДРА на сегодняшний день вышла из применения);
 - использован параметрический способ уравнивания вместо коррелятного.
- Укрупненная блок-схема программы представлена на рисунке 4.1.

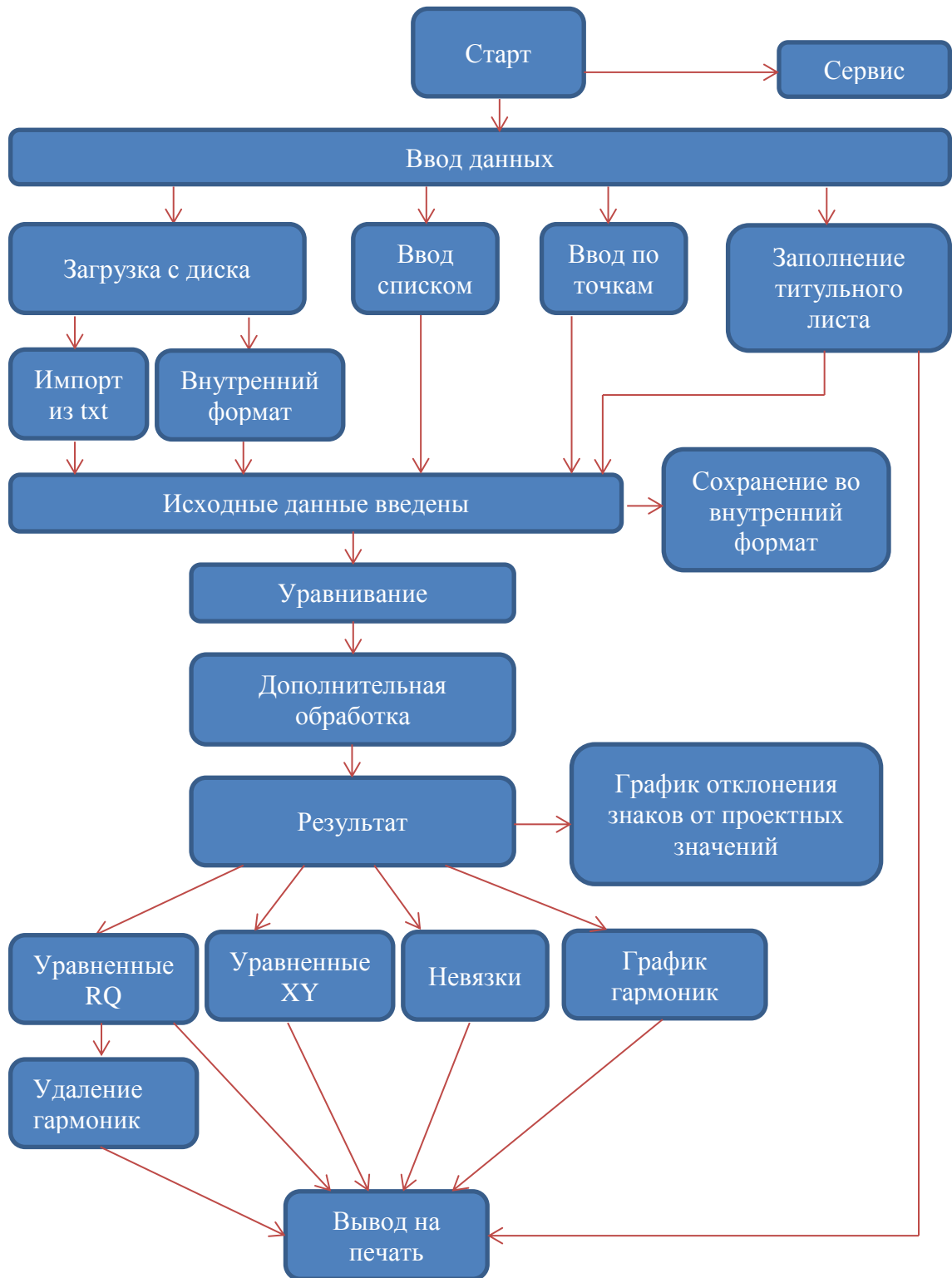


Рисунок 4.1 – Укрупненная блок-схема разработанной программы уравнивания плановой опорной сети ВЭПП-4м

Плановая опорная сеть ВЭПП-4м имеет 94 геодезических знака. Для построения плановой опорной сети выполняются следующие измерения.

Измеряется расстояние S между соседними геодезическими знаками, всего 94 расстояния. Измеряется 94 высоты h в треугольниках на каждых трех соседних геодезических знаках. Проводятся измерения двух высот $H1$ и $H2$ в трапеции на каждых четырех соседних геодезических знаках. Всего измеряется 188 высот трапеций. В написанной программе уравниваются отклонения от проектных величин. Для всех измерений находятся отклонения от проектных величин.

$$\Delta S = S_{\text{изм}} - S_{\text{пр}} , \quad (4.1)$$

$$\Delta h = h_{\text{изм}} - h_{\text{пр}} , \quad (4.2)$$

$$\Delta H1 = H1_{\text{изм}} - H1_{\text{пр}} , \quad (4.3)$$

$$\Delta H2 = H2_{\text{изм}} - H2_{\text{пр}} . \quad (4.4)$$

Информация, полученная по формулам (4.1) – (4.4) заносится в программу. Предусмотрена возможность ввода и корректировки данных по точкам и списками. При вводе информации по точкам, для наглядности, на схеме происходит графическое отображение измерения (рисунок 4.2).

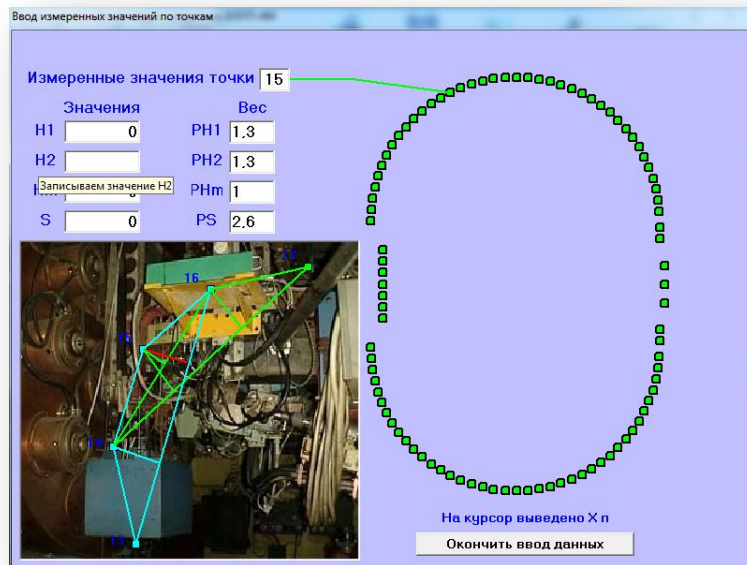


Рисунок 4.2 – Процесс ввода информации в программу уравнивания плановой сети ВЭПП-4

По умолчанию вес каждого измерения уже занесен в программу, но в случае необходимости предусмотрена его корректировка.

Так как на каждом пункте измеряется одна высота треугольника и две высоты трапеции то, один и тот же угол на каждом пункте можно определить независимо трижды, что дает два условия, т. е. две невязки. Угол на i^M пункте вычисляется по измеренным высоте треугольника и расстояниям между соседними пунктами по формуле

$$\beta_i = \arccos \frac{h_i}{S_i} + \arccos \frac{h_i}{S_{i-1}} . \quad (4.5)$$

По измеренным высотам трапеции и расстояниям между соседними пунктами

$$\beta'_i = \arccos \frac{H1_i}{S_{i-1}} + \arcsin \frac{H2_{i+1} - H1_i}{S_{i-1}} + \frac{\pi}{2} , \quad (4.6)$$

$$\beta''_i = \arccos \frac{H1_i}{S_i} + \arcsin \frac{H1_{i-1} - H2_i}{S_{i-1}} + \frac{\pi}{2} . \quad (4.7)$$

Всего в сети вычисляется 188 невязок разностей углов вида

$$\beta - \beta' = W' , \quad (4.8)$$

$$\beta' - \beta'' = W'' . \quad (4.9)$$

Допустимые невязки для треугольников 8", для трапеций 12". Если при обработке измерений какая-либо вычисленная невязка превышает допустимые значения, то проводятся повторные измерения соответствующих величин.

Для позиционирования и ориентации сети пункт №1 и направление №1→№2, принимаются за исходные, т. е. ΔX_1 , ΔY_1 и ΔY_2 равны нулю, то число оцениваемых параметров равно удвоенному количеству пунктов минус три, т.е. $94 \cdot 2 - 3 = 185$. Для нахождения оценок параметров в программу вводится 376 величин, т. е. имеется $376 - 185 = 191$ избыточное измерение. Отсюда возникает задача уравнивания, которая производится по методу наименьших квадратов.

Оценки искомых параметров находят из уравнения

$$A = (X^T \cdot P \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot P \cdot L . \quad (4.10)$$

где X – корреляционная матрица;

P – матрица весов;

L – матрица измеренных величин.

Для оценки точности вычисляется средняя квадратическая ошибка единицы веса:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{[pvv]}{191}\right)} , \quad (4.11)$$

$$[pvv] = L^T \cdot PL - L^T \cdot P \cdot X \cdot A . \quad (4.12)$$

После выполнения уравнивания (4.10) получаем отклонения от проектных величин. Прибавив их к проектным, получим координаты X , Y в системе координат комплекса ВЭПП-4м. Для удобства осуществляется переход от величин X , Y к смещениям пунктов по радиусу R и вдоль орбиты Q . В случае с полукольцами, производится разворот системы координат на угол, равный углу α между направлением оси X и направлением на пункт:

$$R_i = \pm X_i \cdot \sin \alpha \pm Y_i \cdot \cos \alpha , \quad (4.13)$$

$$Q_i = \pm X_i \cdot \cos \alpha \pm Y_i \cdot \sin \alpha . \quad (4.14)$$

Для прямолинейных промежутков R и Q вычисляются по формулам:

$$R_i = \pm Y_i , \quad (4.15)$$

$$Q_i = \pm X_i . \quad (4.16)$$

В плановой опорной сети нет исходных пунктов, то есть она является свободной, все пункты равноправны. Выбор пункта №1 и направления №1→№2 в

качестве исходных является произвольным. Система координат оказывается повернутой и смещенной относительно некоторого оптимального положения. С целью устранения этого недостатка, а так же минимизации числа необходимых подвижек геодезических знаков производится вычисление оптимальных смещений центра координат a , b и угла разворота φ системы координат. В программе смещение и угол разворота вычисляются по 82 пунктам плановой опорной сети полуколец. Прямолинейные промежутки в расчет не берутся.

Преобразование смещений пунктов от проектного положения в оптимальную систему координат в программе производится по формулам:

$$\Delta X_{\text{опт}} = X \cdot \cos \varphi + Y \cdot \sin \varphi - X_{\text{пр}} + a, \quad (4.17)$$

$$\Delta Y_{\text{опт}} = -X \cdot \sin \varphi + Y \cdot \cos \varphi - Y_{\text{пр}} + b. \quad (4.18)$$

где $X_{\text{пр}}, Y_{\text{пр}}$ – проектные координаты пунктов;

X, Y – есть полученные из уравнивания координаты пунктов;

$$X = X_{\text{пр}} + \Delta X;$$

$$Y = Y_{\text{пр}} + \Delta Y.$$

Составив сумму квадратов и приравняв производные a , b и φ нулю, можно решить уравнения:

$$\varphi = \frac{82 \cdot \sum_{i=1}^{82} (\Delta X_i \cdot Y_i) - \sum_{i=1}^{82} (\Delta Y_i \cdot X_i) + \sum_{i=1}^{82} X_i \sum_{i=1}^{82} \Delta Y_i - \sum_{i=1}^{82} Y_i \sum_{i=1}^{82} \Delta X_i}{82 \cdot \sum_{i=1}^{82} (X_i^2 \cdot Y_i^2) - (\sum_{i=1}^{82} X_i)^2 - (\sum_{i=1}^{82} Y_i)^2}, \quad (4.19)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{82} Y_i \cdot \sin \varphi - \sum_{i=1}^{82} \Delta X_i \cdot \cos \varphi}{82}, \quad (4.20)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{82} X_i \cdot \sin \varphi - \sum_{i=1}^{82} \Delta Y_i \cdot \cos \varphi}{82}. \quad (4.21)$$

Фактически, угол φ является средним значением ΔY , деленным на усредненный радиус, а a, b – средними координатами после введения поправок за разворот.

Эта процедура является полезной, но не совсем корректной, т.к. наличие значительных локальных деформаций будет влиять на положение всех пунктов. В то же время, это влияние компенсируется сглаживающей кривой.

Так же, в программе реализован гармонический анализ, анализируются величины гармоник и ожидаемые искажения орбиты. Амплитуды гармоник вычисляются по формулам:

$$a_k = \sqrt{c_k^2 + b_k^2}, \quad (4.22)$$

$$c_k = \frac{2}{P_0} \cdot \sum_{i=1}^{94} \Delta R_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi k S_i}{P_0}\right), \quad (4.23)$$

$$b_k = \frac{2}{P_0} \cdot \sum_{i=1}^{94} \Delta R_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi k S_i}{P_0}\right). \quad (4.24)$$

где P_0 – периметр;

S_i – расстояние между точками;

k – номер гармоники.

В программе предусмотрена возможность удаления нужного числа гармоник с пересчетом сдвижки по радиусу. Окно представлено на рисунке 4.3.

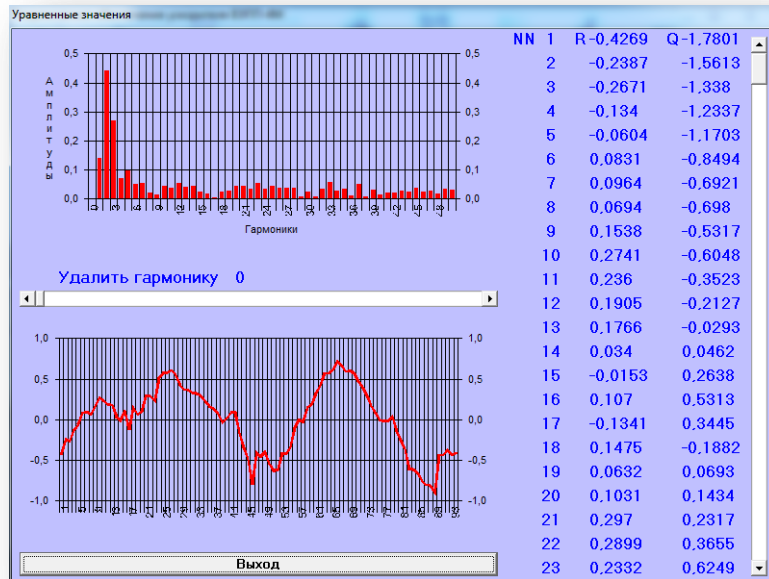


Рисунок 4.3 – Окно программы удаление гармоник из уравненных значений

Для наглядного представления плановых деформаций создано окно показывающее искажение опорной геодезической сети относительно проектных значений рисунок 4.4.

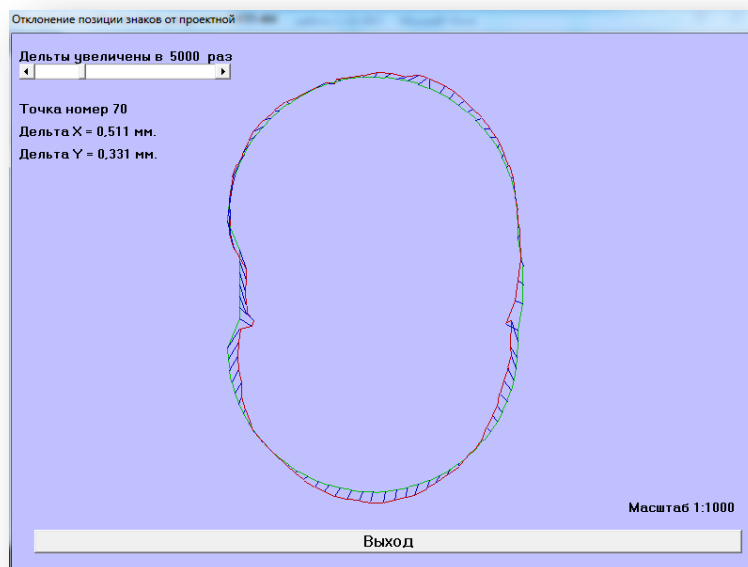


Рисунок 4.4 – Отклонение позиции знаков от проектных значений

После выполнения уравнивания, все результаты доступны в электронном виде с возможностью вывода на печать. Разработанное программное обеспечение применяется для уравнивания плановой опорной геодезической сети комплекса ВЭПП-4м в течении 15 лет.

4.2 Разработка алгоритма и программы обработки результатов геодезических измерений в опорной высотной сети ВЭПП-4м

Для сбора и обработки результатов измерений в высотной опорной геодезической сети комплекса ВЭПП-4м разработан электронный журнал. Журнал создан на базе табличного процессора Excel, для работы в операционной системе Windows.

Опорная высотная сеть комплекса ВЭПП-4м базируется на опорных геодезических знаках плановой сети. Сеть состоит из 94 пунктов. В сети измеряются 106 превышений в 13 полигонах. Всего для одного цикла измерений в электронный журнал вводится 1696 отсчетов.

Электронный журнал состоит из четырех листов. Первый лист (рисунок 4.5) предназначен для ввода информации и оперативного контроля невязок на полигонах.

На первом листе представлена вся программа наблюдений, показано положение нивелира и реек. Отмечены места для ввода отсчетов по основным и дополнительным шкалам для каждой из двух реек. Отсчеты вводятся в поля с надписью “Основная шкала” и “Барабан”. В поле “Основная шкала” записывается отсчет по рейке. В поле “Барабан” количество делений по микрометренному винту Ni007.

	А	В	С	U	Е	F	G	Н	I	J	K	L	M	N	U	P	Q	R	S	T	U	V
	NN Пунктов	NN Пунктов	Основная шашка	Баррабин	Среднее	Превышение	Дополнительная шашка	Баррабин	Среднее	Превышение	Основная шашка	Баррабин	Среднее	Превышение	Дополнительная шашка	Баррабин	Среднее	Превышение	Среднее (дел)	Среднее (мм)		
3	1	8	44,5	44,3	44,4	58,85	58	95,2	95,1	60	8	45,5	45,35	59,8	58	95,9	95,55	60,3	59,7375	2,888975	Дата	
4		7	85,6	85,5			58	35,2	35,1		7	85,8	85,55		58	35,2	35,25					
5		7	85,5				58	35,3			7	85,3			58	35,3						
6		2	64	64			58	14	14		7	63	63		58	12,7	12,85					
7		7	64				58	14			7	63			58	13						
8		6	81	81	-17		58	31	31	-17	7	82	82	-19	58	32	32	-19,15	-18,0375	-0,90187		
9		7	81				58	31			7	82			58	32						
10		3	67,3	67,5			58	17,6	17,55		7	67,2	67,35		58	17,5	17,25					
11		7	67,5				58	17,5			7	67,5			58	17,5						
12		5	73	73,05	-5,65		58	23	23	-5,45	7	72,5	72,4	-5,05	58	22,6	22,55	-5,3	-5,3625	-0,26812		
13		7	73,1				58	23			7	72,3			58	22,5						
14		4	81,9	82	81,95		58	32	32		7	81,5	81,35		58	31	31,3					
15		7	82				58	32			7	81,2			58	31,6						
16		6	96	96	-14,05		58	46	46	-14	7	95,7	95,75	-15,4	58	46,8	46,85	-15,55	-14,75	-0,7375		
17		7	96				58	46			7	96,8	96,75		58	46,9	46,85					
18		3	84	84			58	34	34		7	84,6	84,7		58	34,5	34,4					
19		7	84				58	34			7	84,8	84,7	-15,8	58	34,3	34,4	-16,1	-16,65	-0,8325		
20		7	101,5	101,6	-17,6		58	51	51,1	-17,1	7	100,5	100,5		58	50,5	50,5					
21		7	101,7				58	51,2			7	100,5			58	50,5						
22		2	80,5	80,45			58	30	30,1		7	79	79		58	29,2	29,1					
23		7	80,4				58	30,2			7	79			58	29	29,1	-36,9	-36,15	-1,8375		
24		8	15,5	15,5	-35,05		58	65,5	65,75	-35,65	8	16	16	-37	58	66	66					
25		8	15,5				58	66			8	16			58	66						
26		1	61,5	61,4			59	11	11		8	61	61		59	10,8	10,65					
27		8	61,3				58	11			8	61			58	10,5						
28		9	24,5	24,35	37,05		58	74	74,15	36,85	8	24,7	24,85	36,15	58	75	75	35,65	-36,425	-1,82125		
29		8	24,2				58	74,3			8	25			58	75						
30		4	21,5	21,5			58	71,8	71,65		8	21,2	21,5		58	71,5	71,55					
31	Штапел	5	21,5				58	71,5			8	21,8			58	71,6						
32		8	28,8	28,85	-7,35		58	78,8	78,9	-7,25	8	29,2	29,2	-7,7	58	79	79	-7,45	-7,4375	-0,37187		
33		8	28,9				58	78,9			8	29,2			58	79						
34		8	92,3	92,15			56	41,5	41,6		5	91,5	91,5		56	41,5	41,5					
35	Штапел	5	92,3				56	41,7			5	91,5			56	41,5						
36		9	99,7	99,75	-7,6		56	49	49,25	-7,65	5	99,5	99,4	-7,9	56	49,6	49,55	-8,05	-7,8	-0,38	0,06875	
37		9	99,8				56	49,5			5	99,3			56	49,5						
38					0					0								0				
39																		0				

Рисунок 4.5 – Первый лист журнала (Исходные данные)

Стоит отметить, что вся обработка в журнале происходит по мере введения информации. Вычисляется среднее значение по измеренному превышению, среднее значение по рейке. Перевод из делений нивелира Ni007 в миллиметры. Невязки в полигонах вычисляются сразу же после введения информации о последнем превышении. Программа позволяет оперативно контролировать качество проведения измерений и увеличивает скорость работы. Так же исключаются ошибки вычисления. Общая невязка так же вычисляется автоматически после полного заполнения журнала.

Невязка в полигоне вычисляется по формуле

$$fh = \sum h_i . \quad (4.25)$$

И не может превышать допустимую невязку

$$fh_{\text{доп}} = 2\sigma\sqrt{n} \quad . \quad (4.26)$$

Второй лист журнала используется для вычислений, на котором представлены следующие матрицы: матрица превышений H , матриц взаимосвязей X , матрица весов P .

Уравнивание высотной сети выполняется по формулам:

$$H_{\text{ур}} = H + (P^{-1} \cdot X^T \cdot G^{-1}) \cdot M \quad , \quad (4.27)$$

$$G = X \cdot P^{-1} \cdot X^T \quad , \quad (4.28)$$

$$M = X \cdot H \quad . \quad (4.29)$$

Вычисление по формулам (4.27 – 4.29) занимает значительное машинное время, что не позволяет проводить его при каждом вводе отсчета в табличный процессор. Но если посмотреть на формулу (4.27), то видно, что часть, заключённая в скобки, $(P^{-1} \cdot X^T \cdot G^{-1})$ неизменна. Поэтому, для увеличения скорости счета, эта часть формулы, была обработана в MathCad. А результат вычислений внесен во второй лист электронного журнала. Это дало возможность проводить вычисления в реальном времени, по мере введения отсчетов.

По уравненным превышениям вычисляются отметки геодезических знаков относительно первого знака. После этого определяется средняя отметка, которая вычитается из всех полученных отметок.

В результате на третьем листе журнала табличного процессора получают отметки комплекса ВЭПП-4м относительно средней плоскости (рисунок 4.6). По отметкам автоматически строится график деформаций кольца тоннеля ВЭПП-4м.

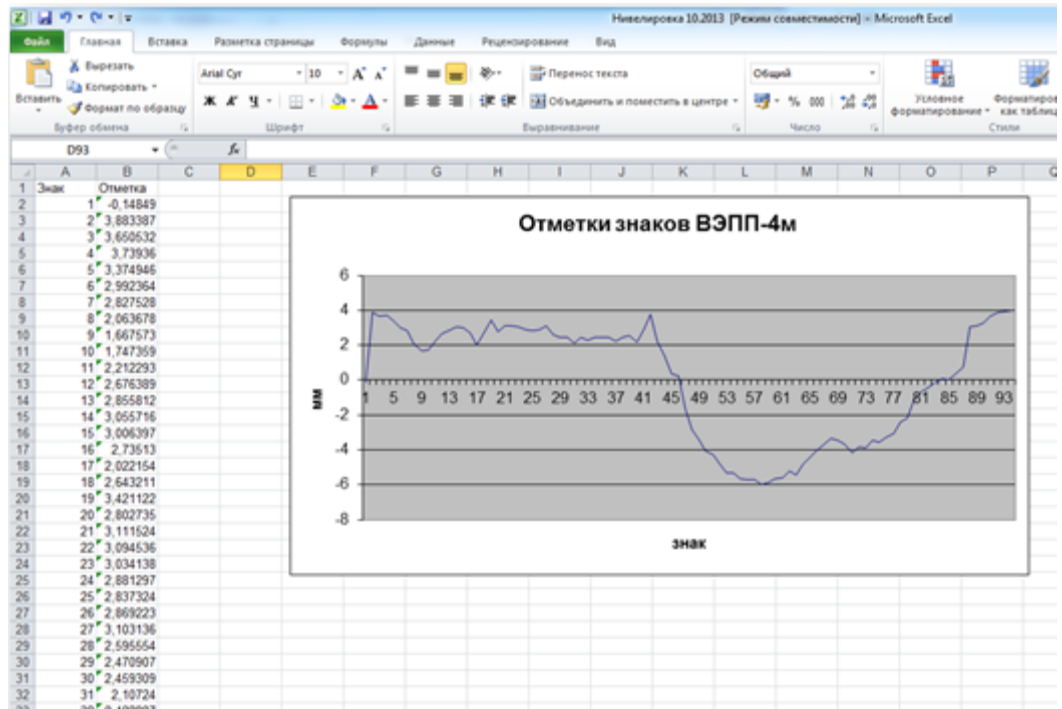


Рисунок 4.6 – График деформаций кольца тоннеля ВЭПП-4м

Высотная сеть, в отличие от плановой, не приводится в проектное положение. На четвертом листе журнала представлены отклонения отметок от средней плоскости с пересчетом в деления микрометрического винта для нивелира №1007 (рисунок 4.7).

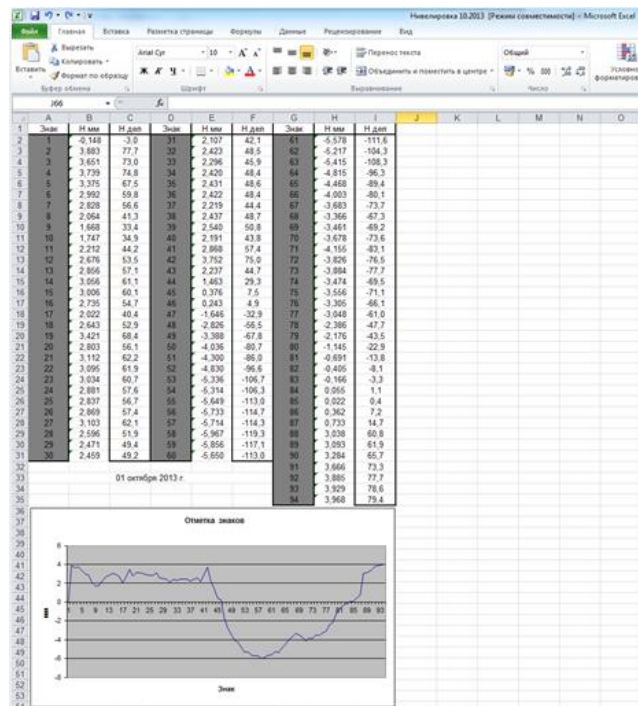


Рисунок 4.7 – Четвертый лист электронного журнала

Информация, приведенная на четвертом листе электронного журнала, распечатывается и применяется при установке магнитных элементов комплекса ВЭПП-4м.

Представленный электронный журнал используется на комплексе ВЭПП-4м в течении последних 11 лет. С его помощью удалось исключить камеральные работы. Готовый результат фактически получается после введения в журнал последнего отсчета. Так же с применением электронного журнала исключена возможная ошибка при проведении вычислений.

4.3 Программа для уравнивания опорной сети макета ускорительного комплекса СГУГиТ

В пакет прикладных программ входит программа для обработки результатов геодезических измерений на макете опорной сети ускорителя. Для обеспечения учебного процесса студентов специальности “Прикладная геодезия” Сибирского университета геосистем и технологий был создан макет опорной кольцевой сети ускорительного комплекса в аудитории 31. Опорная сеть имеет 10 геодезических знаков. По знакам выполняются измерения высокоточным уровнем динамостатом и инварными жезлами. Результаты измерений уравниваются в программном обеспечении, разработанном автором.

Программное обеспечение написано на языке программирования Visual Basic и предназначено для работы в операционной системе Windows.

Геодезическая сеть макета ускорительного комплекса является стационарной, т. е. ее геометрия не изменяется от цикла к циклу измерений. Целью геодезических работ является определение смещений пунктов от их проектного положения.

Для такой сети все вычисления удобно производить в отклонениях измеренных элементов от их номинальных значений, согласно формул:

$$\Delta S = S_{\text{изм}} - S_{\text{пр}} , \quad (4.30)$$

$$\Delta h = h_{\text{изм}} - h_{\text{пр}} , \quad (4.31)$$

$$\Delta H = H_{\text{изм}} - H_{\text{пр}} . \quad (4.32)$$

Число оцениваемых параметров равно удвоенному количеству пунктов минус три, т. е. $10 \cdot 2 - 3 = 17$. Для нахождения оценок параметров $\Delta S, \Delta h, \Delta H$ измеряется 50 величин (10 высот в треугольниках, 20 высот в трапециях и 20 расстояний между пунктами), т. е. имеется $50 - 17 = 33$ избыточных измерения. Отсюда возникает задача уравнивания, которая выполняется по методу наименьших квадратов.

Данные в программу вводятся вручную, с возможностью последующей записи на жесткий диск персонального компьютера. При вводе данных, каждое измерение подсвечивается на схеме (рисунки 4.8, 4.9, 4.10)

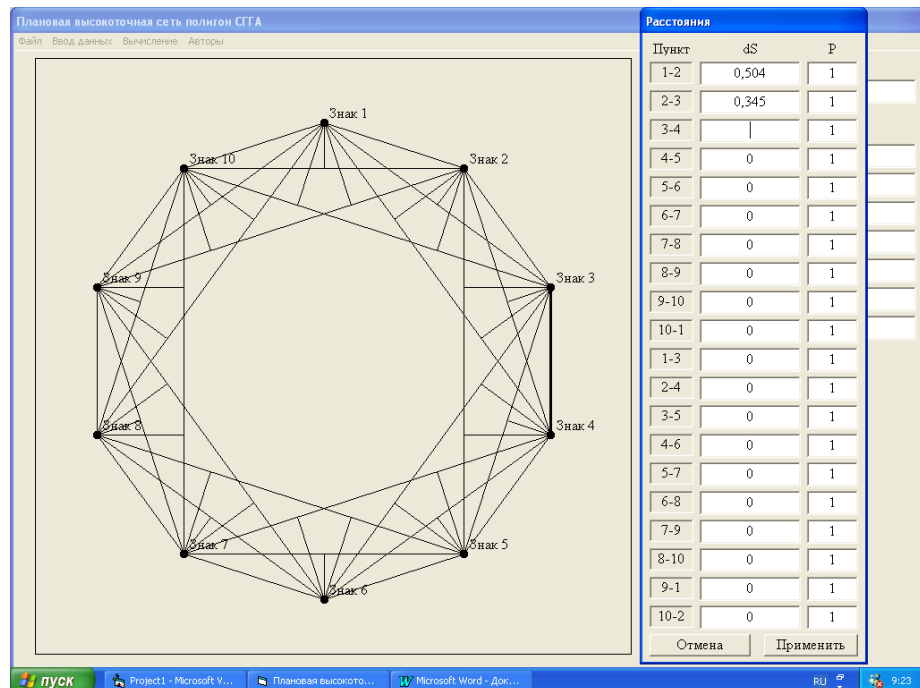


Рисунок 4.8 – Ввод данных. Расстояния

Так же в процессе ввода данных есть возможность корректировки весов измерений.

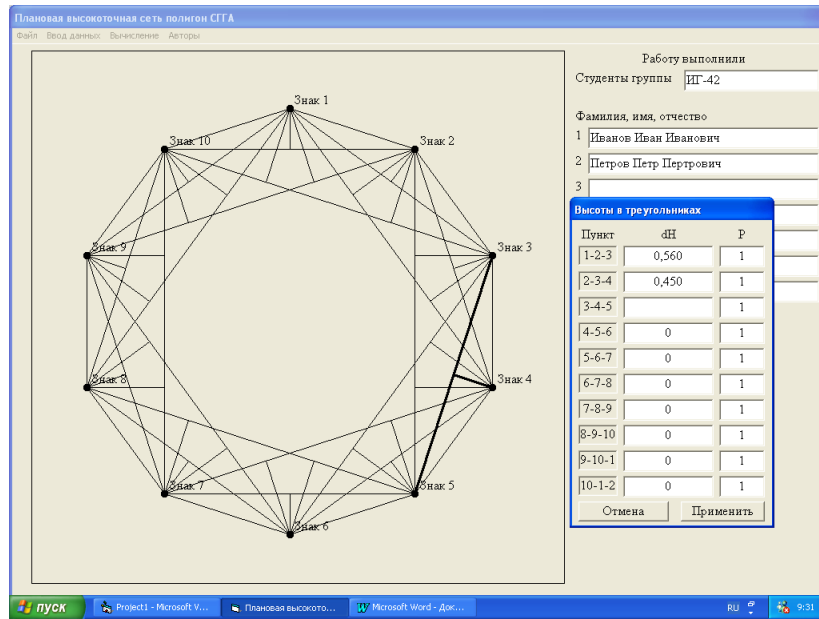


Рисунок 4.9 – Ввод данных. Высоты в треугольнике

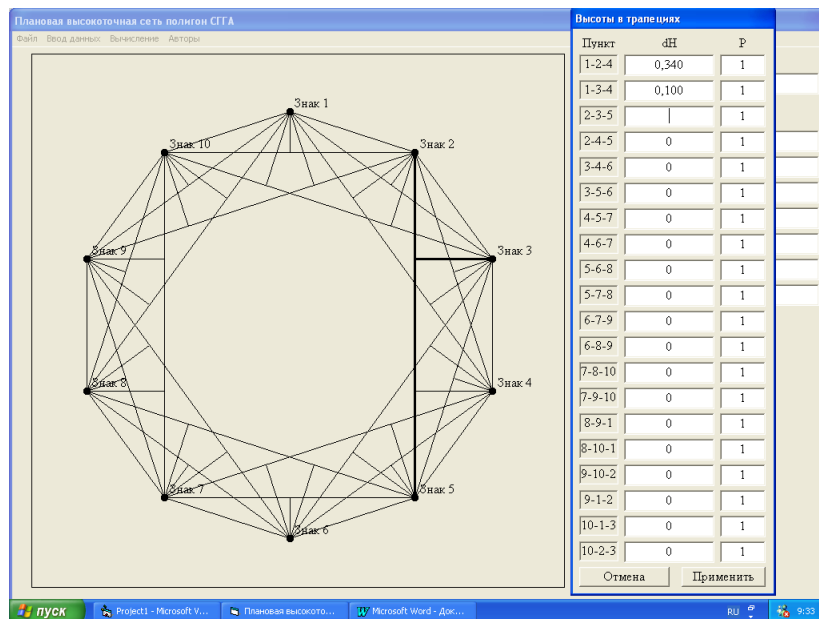


Рисунок 4.10 – Ввод данных. Высоты в трапеции

При нажатии кнопки “применить” введенные данные будут внесены в программу. Кнопка “отмена” закроет окно.

Уравнивание сети выполняется параметрическим способом. Отображение смещений пунктов показано графически (рисунок 4.11). Для наглядного визуального отображения имеется возможность увеличить полученные дельты до 500 раз

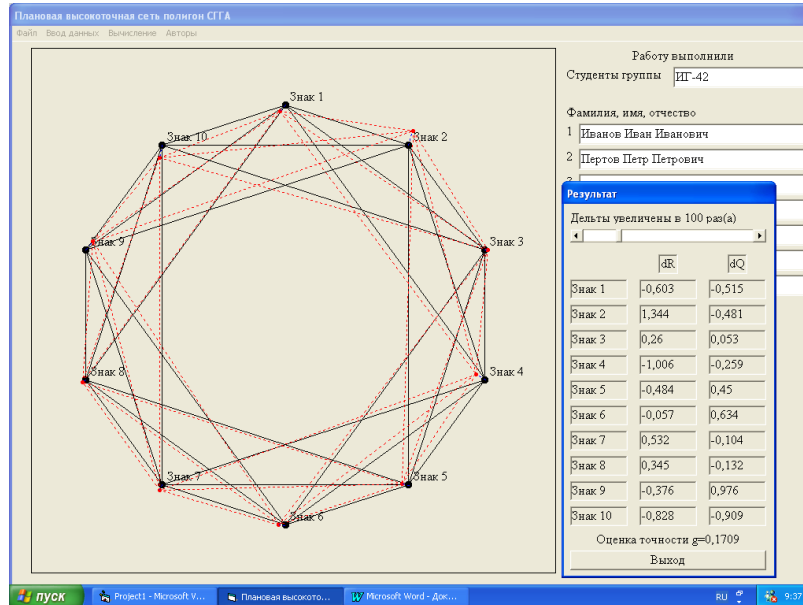


Рисунок 4.11 – Отображение результатов уравнивания

На рисунке 4.12: dR – смещения по радиусу (плюс наружу проектного кольца минус внутрь); dQ – смещение по касательной к орбите (плюс по часовой стрелке вдоль орбиты минус против).

Графическое отображение результатов уравнивания показывает, как стоят пункты опорной сети, и на какую величину требуется сдвинуть знак для приведения его в проектное положение.

Данное программное обеспечение используется для обучения студентов, по специальности “Прикладная геодезия” Сибирского государственного университета геосистем и технологий с 2007 года[4].

4.4 Программы “Виртуальный полигон” и “Нивелирование по трассе”

“Виртуальный полигон”.

Программа разработана для студентов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). При помощи программы (рисунок 4.12) создается участок местности площадью 500 x 500 м с перепадом высот в 5,5 м с озерами оврагами, крутыми склонами. На этом участке

расположены 10 пунктов с известными отметками. Пункты обозначены буквами А, В, С, D, E, F, I, J, K, L.

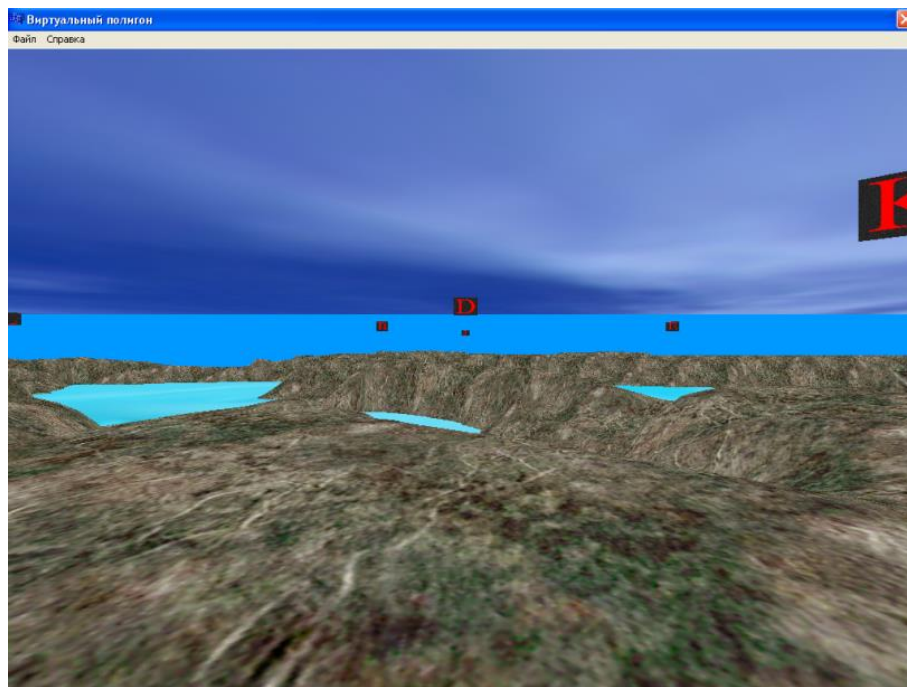


Рисунок 4.12 – Рабочее окно программы.

В программе создается вид от первого лица. Положение указателя мышки на экране, задает направление взгляда. Имеется возможность перемещения по данному участку местности в любом направлении. Студент имеет в своем распоряжении две рейки и нивелир. Есть возможность установки реек и нивелира в любом месте, исключая участки затопленные водой. Задача студента – измерить превышение между указанными преподавателем пунктами. Есть несколько пунктов, между которыми можно измерить превышение, только проложив нивелирный ход (слишком большой перепад высот, препятствия).

Программа разработана на языке программирования C++Builder. Программа может служить в качестве тренажера для обучения студентов 1 курса взятию отсчетов по рейкам, прокладки нивелирных ходов по пересеченной местности и обработке полученных результатов и т. п.

“Нивелирование по трассе”.

Программа разработана для студентов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального

образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС). При помощи программы (рисунок 4.13) создается участок местности для трассирования площадью 300 x 1500 м с перепадом высот в 12,5 м с озерами оврагами, крутыми склонами, линейными и площадными объектами. На этом участке местности представлены два репера и пять вариантов возможных трасс. Трассы имеют разбитый пикетаж. В программе создается вид от первого лица. Положение указателя мышки на экране, задает направление взгляда. Имеется возможность перемещения по местности в любом направлении. Студент имеет в своем распоряжении две рейки и нивелир. Есть возможность установки реек и нивелира в любом месте данной местности. Задача студента – выполнить измерения, построить продольный или поперечный профиль трассы по заданию преподавателя.

Программа разработана на языке программирования C++Builder [3, 13, 61].

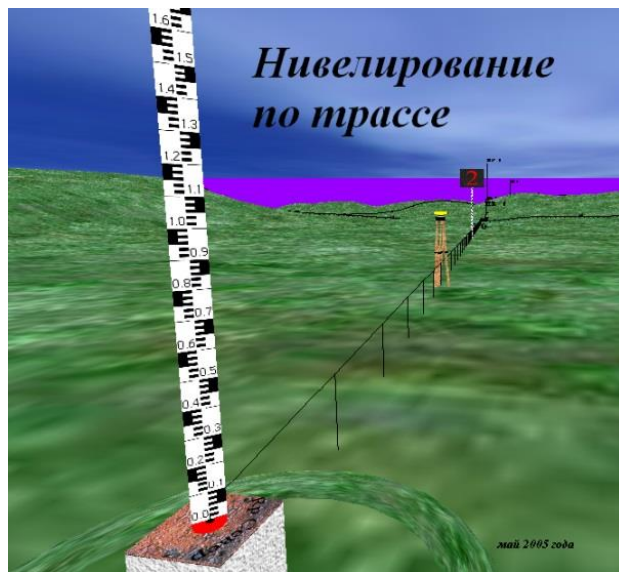


Рисунок 4.13 – Окно программы “Нивелирование по трассе”

На данный программный продукт получено свидетельство об отраслевой регистрации разработки №11783 [30].

4.6 Разработка алгоритма и программного продукта для построения 3-D моделей по геодезическим данным.

Разработан дополнительный модуль для трехмерной визуализации тоннеля ВЭПП-4м, позволяющий отображать пространственное положение технологического оборудования и деформации тоннеля ускорителя в 3D. В качестве исходных данных используются результаты уравнивания плановой и высотной сети. Программа создает трехмерную модель ускорительного комплекса ВЭПП-4м. По тоннелю комплекса можно свободно перемещаться в любом направлении, и наблюдать его с любых удобных мест. Деформации опорной сети показаны относительно проектных значений. Программа демонстрирует трехмерную деформацию конструкций тоннеля. Для наглядной визуализации величину деформации можно увеличить в несколько раз. Окно программы представлено на рисунке 4.14.

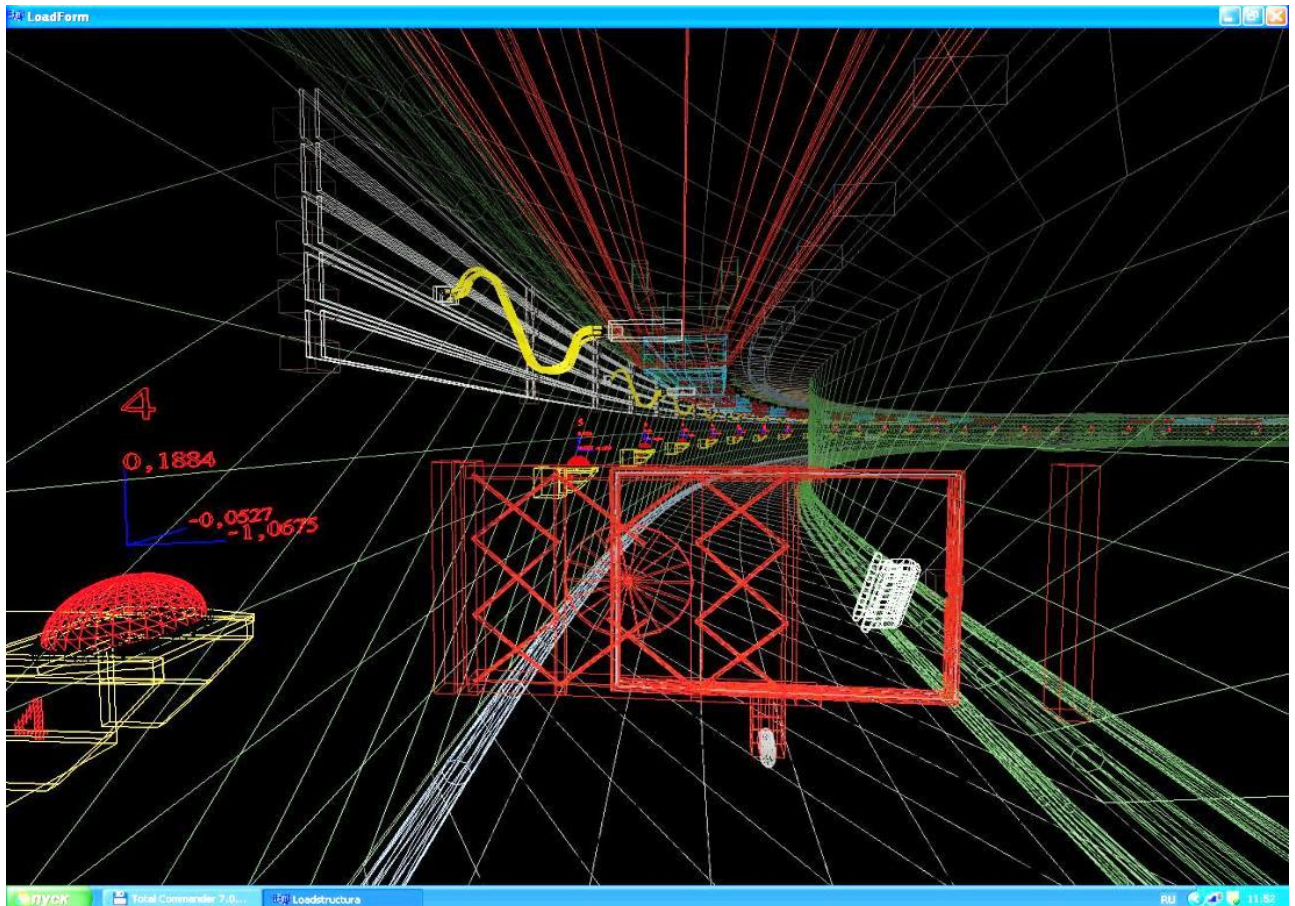


Рисунок 4.14 – Фрагмент тоннеля ВЭПП-4м в 3D

В связи с тем, что современные УНК как зарубежные, так и отечественные, занимают все большую площадь. Строительство УНК ведется в виде подземных кольцевых и линейных тоннелей с различными подземными и наземными коммуникациями (например, строительство С-Тау фабрики, в Советском районе города Новосибирска). Становится актуальной техническая задача по построению моделей территорий городов и поселков со всей инфраструктурой, где собираются осуществить строительство УНК или других уникальных инженерных сооружений.

Для территорий, где ведется строительство надземных и подземных объектов разработаны алгоритмы и программный продукт, позволяющий по геодезическим данным создавать трехмерные модели. Возможности алгоритма и программного продукта можно продемонстрировать на примере программ для построения модели города Новосибирска и поселка Белый Яр.

Модель города Новосибирск в 3D.

Данная работа может быть интересна в первую очередь администрациям городов и населенных пунктов. Наглядное представление инженерно-топографической информации в виде цельного, объемного изображения. Трехмерная модель города, поселка, населенного пункта, со всеми коммуникациями. Простота навигации и быстрый выбор нужного объекта.

Разрабатываемая программа может быть использована как графическая составляющая ГИС-приложения.

Инженерно-топографическая информация цифрового плана масштаба 1:500 представлена в основном на плоскости. Например, программный комплекс MapInfo. При настоящем развитии компьютерной техники появилась возможность получить трехмерные модели цифрового плана масштаба 1:500. Причем модели не только зданий и сооружений, но и подземных и наземных коммуникаций (дорог, газонов, линий электропередач, тоннелей, канализаций, трубопроводов, различной растительности и т. д.)

Разрабатываемое программное обеспечение использует файлы MapInfo и автоматически создает трехмерную модель, опираясь на классификатор инженерно-топографической информации. Данные об объектах берутся непосредственно из таблицы слоя. Например, слой “Здания из дерева”. Слой представлен двумя файлами с расширением MID/MIF. Файл с расширением MID содержит семантическую информацию. В качестве основы используется код объекта, например, 44230000. Этот код обозначает здание жилое неогнестойкое. Далее в окне таблицы указывается этажность, например, два этажа, материал сооружения – дерево, функциональное назначение, тип улицы, название улицы и номер дома. Для построения трехмерного объекта из данной таблицы используем код, этажность и материал. На основе взятых данных рисуется двухэтажный деревянный дом. Информация о местоположении данного дома и его конфигурации находится в файле с расширением MIF. В итоге получается здание с координатной привязкой к местности нужной высоты из нужного материала. Отметим недостатки данного способа. Зачастую в программе MapInfo над одним проектом работают несколько человек и, как правило, этот проект постоянно обновляется, добавляются новые слои, строятся-сносятся здания, и получается, что часть информации, допустим, о зданиях, просто оказывается не внесенной. Например, в графе материал вместо деревянного здания стоит просто прочерк. Конечно, это скорее исключение из правил, но для построения корректной и достоверной модели требуется по возможности полная информация.

Скриншот фрагмента работы программы представлен на рисунке 4.15.

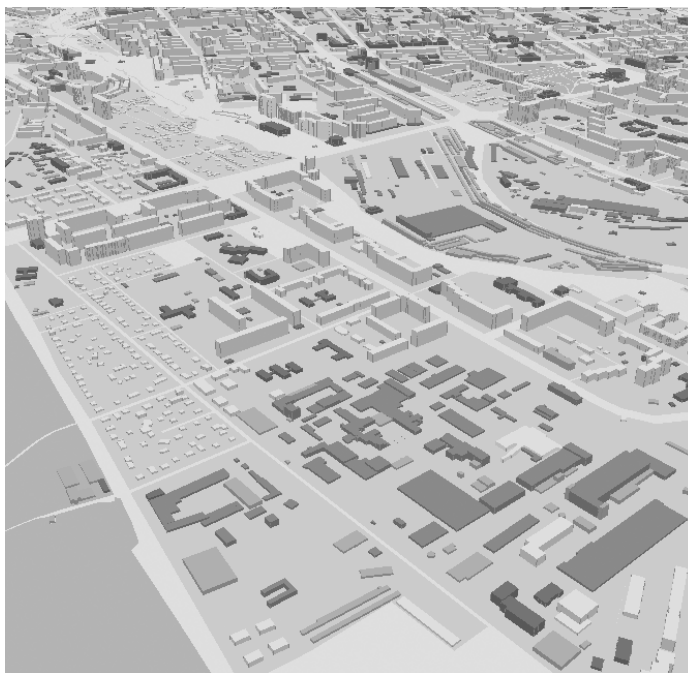


Рисунок 4.15 – Фрагмент 3-D модели города Новосибирск

Модель поселка Белый Яр в 3D.

Разработана программа для 3-D моделирования поселка Белый Яр (рисунок 4.16). Программный продукт позволяет отобразить все коммуникации (в том числе и подземные, рисунок 4.17) , растительность, подписи и т. п [11, 27]. В модели применено текстурирование (наложение фотографий на объекты), что дает реалистичное изображение. Созданы шаблоны объектов (точечные объекты столбы, деревья, колодцы выполнены в виде готовых шаблонов) дающие большую гибкость и простоту адаптации для разных проектов.

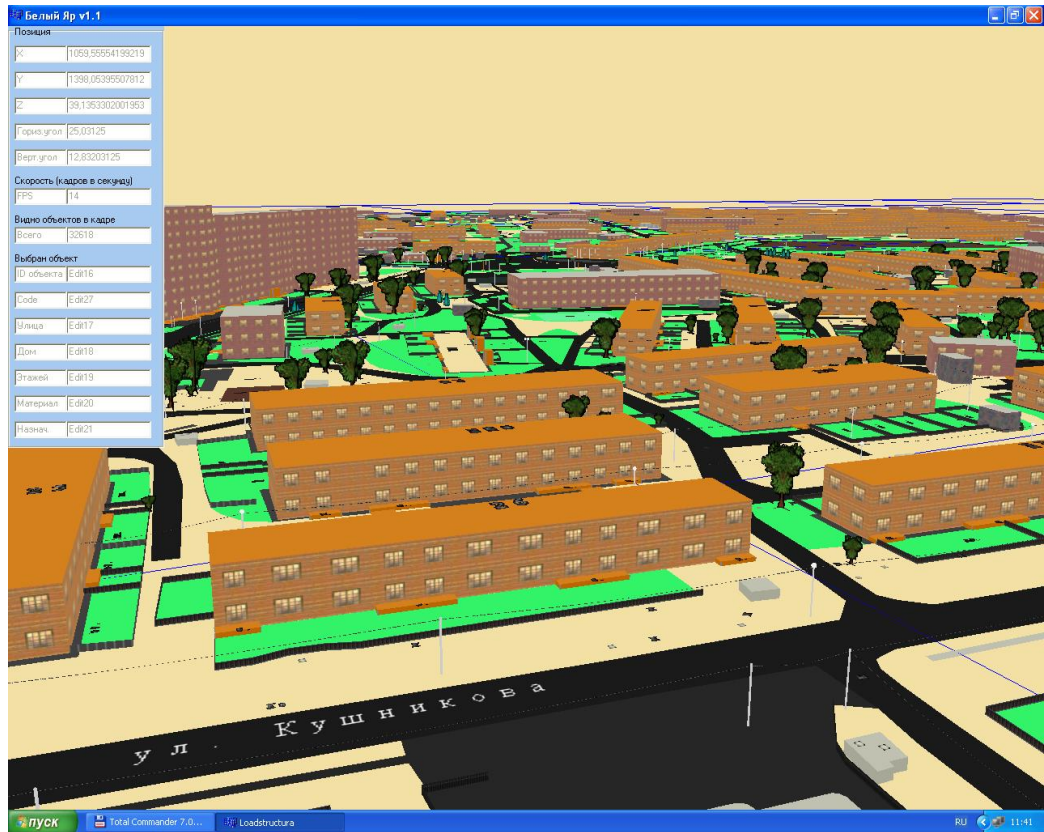


Рисунок 4.16 – Скриншот программы поселок Белый Яр

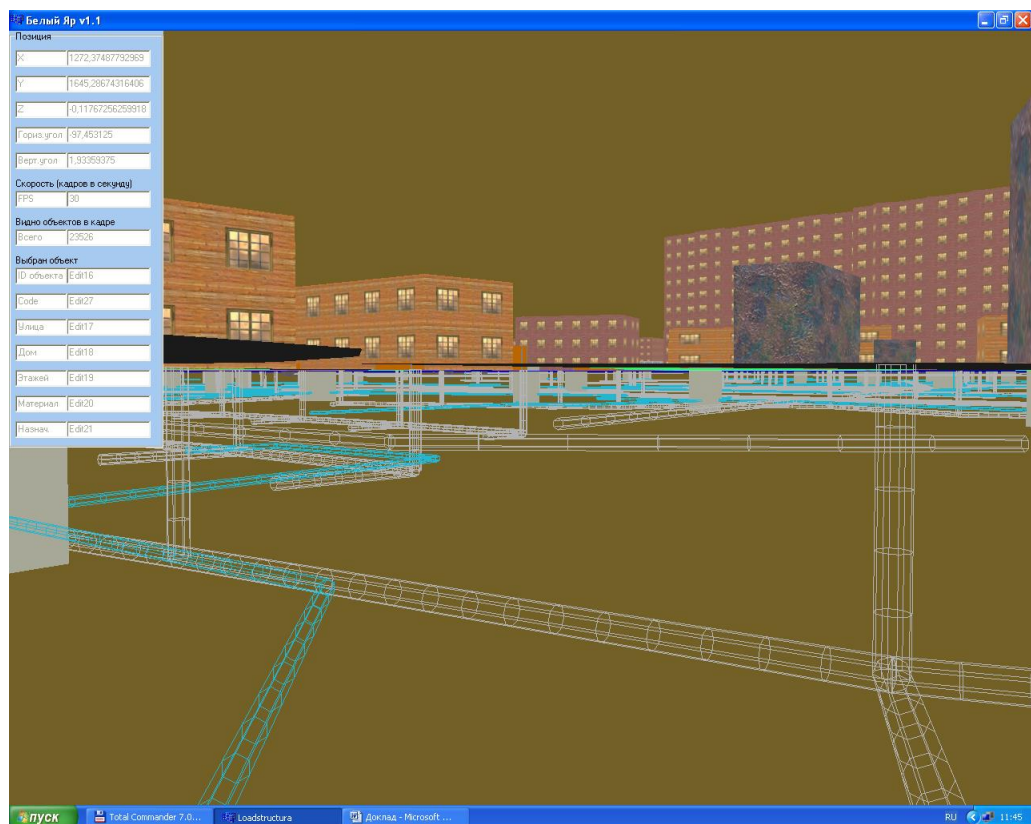


Рисунок 4.17 – Скриншот программы поселок Белый Яр с подземными коммуникациями

Программы написаны на языке программирования C++ Builder 6.0 с использованием библиотек визуализации OpenGL [63]. Минимальная конфигурация системы Pentium 4, ОЗУ от 256 Мб, видео от GeForce 2 MX400.

Разработанные алгоритмы и пакет прикладных программ позволяют решать целый комплекс задач, возникающих при геодезическом обеспечении ускорительных комплексов, обучении студентов, построении 3-D моделей объектов, инженерных сооружений, поселков, городов, и территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования поставленная цель достигнута. Итоги выполненного исследования:

– показана актуальность разработки методик для применения лазерных трекеров на ускорительных комплексах, отличающихся от производственных методик применения этих приборов;

– в результате выполненных исследований установлено, что для повышения точности геодезических измерений установленный производителем прогрев API Laser Tracker 3 должен быть увеличен как минимум на 15–20 минут;

– исследование работы внутреннего электронного уровня выявило некорректную установку API Laser Tracker 3 в горизонт. Точность, заявленная фирмой изготовителем (2"), в реальности оказалась грубее в пять раз. Выявлена систематическая ошибка калибровки электронного уровня. Проведена модернизация лазерного трекера, которая позволила достичь точности определения отклонений от горизонта 0,5";

– разработана методика работы с лазерным трекером на ускорителях в процессах: изготовления магнитных элементов, сопровождения магнитных измерений, периодической юстировки в проектное положение при последующей эксплуатации комплексов. Заменены многие трудоемкие процессы с применением механических средств измерений. Методика внедрена в производственный процесс Института ядерной физики СО РАН, использовалась на комплексах ВЭПП-4м, ВЭПП-2000 и при производстве магнитных элементов ускорительных комплексов в контрактах: № 26165 от 23 мая 2007 г. с IHI Co Ltd, Япония (дипольные магниты для медицинского центра ионной терапии в Gunma University); № 159-315 от 07 мая 2010 г. с Брукгейвенской Национальной Лабораторией, США (изготовление бустера для комплекса NSLS-II); № TD-100410-d-TZI от 09 ноября 2010 г. с EBG MedAustron, Австрия (24 дипольных магнита синхротрона MBH-C, для ионного центра терапии рака); № 120406 от 23

июля 2012 г. с EBG MedAustron, Австрия (13 дипольных магнита каналов высокой энергии МВН-Е для ионного центра терапии рака);

– разработанные алгоритмы реализованы в пакете прикладных программ для обработки результатов геодезических измерений и построения 3D-моделей.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при создании уникального технологического оборудования для российских и зарубежных ускорительных комплексов. Перспективы научных исследований заключаются в том, что они могут быть продолжены в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абсолютный трекер Leica AT901 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geospecprom.ru/products/trackers-leica/trackers-leica-at901.html>. – Загл. с экрана.
- 2 Асташенков, Г. Г. Геодезические работы при эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования [Текст] / Г. Г. Асташенков . – М.: Недра, 1986. –151 с., ил.
- 3 Березин, Б. И. Начальный курс С и С++ [Текст] / Б. И. Березин, С. Б. Березин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 288 с.
- 4 Блаттнер, П. Использование Microsoft Excel 2002 [Текст] / П. Блаттнер. – М.: Вильямс, 2002. – 864 с.
- 5 Большаков, В. Д. Высокоточные геодезические измерения для строительства и монтажа Большого Серпуховского ускорителя [Текст] / В. Д. Большаков, О. И. Горбенко, О. Д. Климов. – М.: Недра, 1968. –304 с.
- 6 Большой адронный коллайдер [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Большой_адронный_коллайдер. – Загл. с экрана.
- 7 Будкер, Г. И. Ускорители со встречными пучками частиц [Текст] / Г. И. Будкер // *УФН*. –1966. – Т. 89. – С. 533–547.
- 8 Википедия ВЭПП-2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ВЭПП-2000>. – Загл. с экрана.
- 9 Высокоточные инженерно-геодезические работы по созданию опорной геодезической сети ускорителя [Текст] : метод. указания / М. А. Боков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский. – Новосибирск: СГГА, 2007. – 50 с.
- 10 ВЭПП-2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vepp2k.inp.nsk.su/>. – Загл. с экрана.
- 11 Геодезический мониторинг подземных коммуникаций с применением 3D-моделирования [Текст] / И. О. Биндер, Д. Б. Буренков, Г. А. Гринь, П. П. Мурзинцев // *Геодезия и картография*. – 2011. – № 4. – С. 5-9.

12 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.

13 Герберт, Ш. Справочник программиста по C/C++ [Текст] / Ш. Герберт; пер. с англ.– 3-е изд. – М.: Вильямс, 2003.– 432 с.

14 Глушаков, С. В. Программирование в среде Windows [Текст] / С. В. Глушаков, В. В. Мельников, А. С. Сурядный.– Харьков: АСТ, Фолио, 2000.– 487 с.

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

16 Достижения и современные проблемы физики высоких энергий [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.psj.nsu.ru/lector/skrinsky/>. – Загл. с экрана.

17 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.

18 Жуков, Б. Н. Пути повышения точности геодезических измерений в условиях влияния возмущающих воздействий [Текст] / Б. Н. Жуков, Г. А. Уставич // Межвузовский сборник / Новосиб. ин-т инж. геодезии, аэрофотосъемки и картографии.– Новосибирск.– 1979.– Т. 7(47).– С.9-13.

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 Измерительный комплекс для аттестации угловых и линейных измерительных систем УМК-М / Е. С. Бахарев, Н. Х. Голыгин, С. В. Травкин, О. Б. Хиноева, Х. К. Ямбаев // Приборы.– 2006.– № 5(71). – С. 50-54.

21 Инновационные решения в метрологии и системах неразрушающего контроля. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nevatec.ru/>. – Загл. с экрана.

22 ИСО 31 (0-13). Величины и единицы [Текст] : междунар. стандарт, 1992.

23 ИСО 1000. Единицы СИ и рекомендации для использования их дольных, кратных и других единиц [Текст] : междунар. стандарт, 1992 .

24 Исследование точности измерения превышений лазерным трекером API Tracker 3 в ИЯФ СО РАН [Текст] / М. А. Боков, Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский. Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // Гео-Сибирь-2010 : сб. материалов VI Междунар. науч. конгр. – Новосибирск:СГГА, 2010. – Т.1, вып. 1. – С. 119–125.

25 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 // Известия вузов. Геодезия и Аэрофотосъемка.– 2012.– № 6.– С.25-28.

26 Исследование точностных характеристик дальномеров API Laser Tracker 3 [Текст] / Д. Б. Буренков, П. П. Мурзинцев, А. В. Полянский, Ю. А. Пупков, Л. Е. Сердаков // ГеоСибирь-2011: сб. материалов VII междунар. науч. конгр.– Новосибирск.– 2011.– Т.1, ч.1.– С. 9-12.

27 Карпик, А. П. Геодезическая пространственная информационная система для обеспечения устойчивого развития территорий [Текст] : дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук : 05.24.01 / Карпик Александр Петрович.– Новосибирск, 2004.– 294 с.

28 Козак, В. Р. Матобеспечение для ЭВМ Одра и ОДРЕНОК программы обработки текстовых файлов [текст]: препринт 88-23 / В. Р. Козак. –Институт ядерной физики. – 36 с.

29 Комплекс геодезических работ при монтаже технологического оборудования линейного ускорителя мезонной фабрики [Текст] / И. Ю. Васютинский, Л. А. Козлов, Н. Н. Тарфеев и др.// Известие вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2001. – № 5.– С.65-68.

30 Компьютерный тренажер нивелирования Leveling 2.0 [Текст] : свидетельство об отраслевой регистрации разработки №11783, 13 ноября 2008 года / В. С. Матвиенко, Ф. Г. Фомин, А. В. Андреев, Д. Б. Буренков ; федеральное

агентство по образованию ФГНУ “Государственный координационный центр информационных технологий”. Отраслевой фонд алгоритмов и программ.

31 Коронкевич, В. П. Лазерная интерферометрия [Текст] / В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, Ю. Н. Дубнищев.– Новосибирск: Наука, 1983.–212 с.

32 Коронкевич, В. П. Лазерные интерферометры и их применения [Текст] / В. П. Коронкевич, В. А. Ханов.– Новосибирск, 1984.– 102 с.

33 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: ИЯФ СО РАН, 1999. – 17 с.

34 Левашов, Ю. И. Критерии и технология прецизионной установки магнитов ВЭПП-4м методом сглаживания [Текст] : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 01.04.20 / Левашов Юрий Иванович.– Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1999. – 113 с.

35 Левчук, Г. П. Прикладная геодезия: Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, Н. Н. Лебедев. – М.: Недра, 1983. – 400 с.

36 Левчук, Г. П. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В. Г. Конусов. – М.: Недра, 1981. – 438 с.

37 Марфенко, С. В. Высокоточные геодезические работы при строительстве и эксплуатации прецизионных сооружений [Текст] : учеб. пособие / С. В. Марфенко.– М.МИИГАиК, 2004.– 36 с.

38 Марфенко, С. В. Точная установка магнитов протонного синхротрона [Текст] / С. В. Марфенко, А. К. Певнев, Н. И. Порубай // ПТЭ.– 1962.– № 4.– С. 55-65.

39 Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины [Текст].– М.: Стандартинформ, 2010.– 92 с.

40 Методы и приборы высокоточных геодезических измерений в строительстве [Текст] / В. Д. Большаков, И. Ю. Васютинский, Е. Б. Ключин и др. – М.: Недра, 1976. – 335 с.

41 Микроскоп измерительный универсальный УИМ-23 [Текст] : инструкция к пользованию; ордена Ленина Ленинградское оптико-механическое объединение. – Л., 1970.

42 Михелев, Д. Ш. Координатный метод разбивочных работ [Текст] / Д. Ш. Михелев, В. А. Шлепы, Ю. Д. Михелев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – № 1. – С. 17 – 21.

43 Новак, В. Е. Курс инженерной геодезии: учебник для строит. спец. вузов [Текст] / В. Е. Новак, В. Ф. Лукьянов, Ю. И. Кирочкин и др.; – М.: Недра, 1989. – 360 с.

44 Новый технологический процесс проведения предупредительного ремонта приспособления для сборки отсека пола первой кабины самолета СУ-30МКИ с применением лазерного трекера [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.moluch.ru/archive/43/5224/> – Загл. с экрана.

45 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 // Гео-Сибирь- 2012: сб. материалов междунар. науч. конгр. – Новосибирск, 2012. – Т.1, ч.1. – С. 183-188.

46 Пимшин, Ю. И., Кривоногов В. Г., Науменко Г. А. Метрологическая аттестация лазерных средств измерений. Ростов н/Д: РГСУ, 1998. - С.3 - Деп.ВИНИТИ 4.06.98, №1737-В98.

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

48 Планета Земля 7.1.1.1888 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Google.

49 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.

50 Поверка и калибровка лазерных трекеров и наземных сканеров на универсальном комплексе эталонов сложных координатных измерений УМК-М [Текст] / Н. Х. Голыгин, Д. Д. Комаров, В. Г. Лысенко, В. Б. Непоклонов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.– 2014.– № 1.– С. 22–28.

51 Поверка и калибровка современных оптико-электронных геодезических приборов [Текст] / Н. Х. Голыгин, Д. Д. Комаров, П. А. Черепанов // Геодезия и картография. – 2012. – № 12.– С.139-143.

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

53 Порубай Н. И. О необходимой точности геодезических измерений смещений и деформаций фундаментов и технологических конструкций современных ускорителей [Текст] / Н. И. Порубай, Е. К. Тарасов // ИТЭФ-49.– М.,1979.– С. 36.

54 Протопопов, И. Я. Система допусков на установку магнитов ускорителей на большие энергии [Текст] / И. Я. Протопопов, Ю. А. Пупков, А. Н. Скринский // Материалы Всесоюзной научно-техн. конф., Новосибирск, 1978 г.– М.: ЦНИИГАиК, 1980.

55 Пупков, Ю. А. Развитие метода частных створов и его применение для построения кольцевых сетей [Текст] / Ю. А. Пупков // Межвузовский сборник научных трудов. Применение геодезических методов при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений / Новосиб. ин-т инж. геодезии, аэрофотосъемки и картографии. – Новосибирск.–1979.– Т. 7(47). – С. 13-20.

56 РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений.– М.: Стандартинформ,2014. –55 с.

57 Рязанцев, Г. Е. Приборы и методы угловых измерений при монтаже оборудования ускорителей [Текст] / Г. Е. Рязанцев, А. М. Назаров.– М.: ЦНИИАтоминформ, 1978.

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

59 Состояние работ по бустеру для NSLS-II [Текст] / Д. Б. Буренков, А. В. Акимов, О. В. Анчугов и др. // ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ и ТЕХНИКИ (ВАНТ). – 2012.– № 4(80).

60 Столбов, Ю. В. Контроль точности монтажа технологического оборудования нефтехимических предприятий [Текст] / Ю. В. Столбов // Геодезические работы в строительстве и мелиорации.– М.: ВАГО АН СССР, 1980.– С. 96-99.

61 Теллес, М. BorlandC++ Builder. Библиотека программиста [Текст] / М. Теллес.– СПб.: Питер Ком, 1998.– 512 с.

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

63 Хилл, Ф. OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов [Текст] / Ф. Хилл.– СПб.: Питер, 2002.–1088 с.: ил.

64 ЦЕРН. История и настоящее физики элементарных частиц. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.znaniya-sila.narod.ru/intoknow/itk000_09.htm. – Загл. с экрана.

65 Шторм, В. В. Приборы и методы линейных измерений при монтаже оборудования ускорителей [Текст] В. В. Шторм. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1978.– С. 41-57.

66 Шумилов, К. Г. Средства измерения линий высокоточные нестандартные [Текст] : методика поверки / К. Г.Шумилов, М. А.Боков, В. В.Котов; Сибгеоинформ. МИ УЯВИ 01-92.– Новосибирск, 1992.– 18 с.

67 Ямбаев, Х. К. Высокоточные створные измерения [Текст] / Х. К. Ямбаев.– М.: Недра, 1978. – 225 с.

68 Ямбаев, Х. К. Высокоточные створные измерения при строительстве ускорителей [Текст] / Х. К. Ямбаев.– М.: ЦНИИАтоминформ, 1974.– 64 с.

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

70 Agilent 5529A Dynamic Calibrator. Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5964-9307E.pdf?id=1000030922> :epsg:dow. 5964-9307E.pdf – 12 с.

71 An Important Factor in Precise Measurements: Laser Tracker Warm-up Time [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.builditsoftware.com/2015/03/5-laser-tracker-warm-tips-ideal-measurement-conditions/>. – Загл. с экрана.

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

73 API Metrology Equipment and Laser Trackers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.apitechnical.com/metrology-equipment/> – Загл. с экрана.

74 API Product Specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://apitechnical.com/Downloads/2012/T3-Product-Specifications.pdf>. – Загл. с экрана.

75 Bain, G. Automation by microcomputer of a geodetic distance measuring instrument : the distinvar [Text] / G. Bain.– Geneva : CERN, 1985.

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

77 COMPONENT DESIGN AND TESTING FOR THE PRINCETON-STANFORD COLLIDING-BEAM EXPERIMENT [Text] / G. K. O'NEIL. – Princeton University, Princeton, N.J. Session VI.– P. 247-255.

78 Distinvar [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://cds.cern.ch/record/42405>. – Загл. с экрана.

79 Faro Kalibrierung und Einmessung von Robotern mit dem Laser-Tracker [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.maschinenmarkt>.

- vogel.de/themenkanale/produktion/messtechnik_prueftechnik/ articles/ 264500/.–
Загл. с экрана.
- 80 Faro Laser Tracker [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.faro.com/products/metrology/faro-laser-tracker/overview>. – Загл. с экрана.
- 81 Froome, K. D. Distans measurement by means of a light ray modulated at a microwave frequency [Text] / K. D. Froome, R. H. Bradsell // J.Sci.Instr.– 1961.–38.– P.458-462.
- 82 Gassner, G. Instrument tests with new Leica AT401 [Text] / G. Gassner, R. Ruland // IWAA 2010, Bessy Sept 2010.
- 83 Gervaise, E. J. Length measurement devices [Text] / E. J. Gervaise, N. Wilson // CERN 87-01.– 9 February 1987.–P.159.
- 84 Gervaise, J. AUOMATIC MEASURING DEVICE [Text] / J. Gervaise.– ISR-SU/67-59.– 2 november 1967.
- 85 Gervaise, J. High-precision survey and alignment techniques in accelerator construction [Text] / J. Gervaise // CERN scientific report.– 1974.– V.1, № 9.– PP. 47-66.
- 86 ISO10360-2 2009 Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions.
- 87 Jean-Pierre Quesnel A strategy for the alignment of the LHC [Text] // CERN*, 1211 Geneva 23, Switzerland.
- 88 Laser Tracker System [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.leica-geosystems.com/en/Laser-Tracker-Systems_69045.htm. – Загл. с экрана.
- 89 Laser Tracker to be Used in 500 – Meter Radio Telescope [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-article/laser-tracker-be-used-500-meter-radio-telescope.html>. – Загл. с экрана.
- 90 Metrology precision inspection & laser measurements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.primemachine.com/onsite-services/metrology/>– Загл. с экрана.

91 O'Neill, G. K. Storage Ring Synchrotron: Device for High Energy Physics Research [Text] / G. K. O'Neill // Physical Review.– 1956.– V.102.– P.1418-1419.

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

93 Robert E. Ruland THE CHESAPEAKE LASER TRACKER IN INDUSTRIAL METROLOGY*[Electronic resource] Stanford Linear Accelerator Center Stanford University. – Режим доступа: (<http://www.slac.stanford.edu/econf/C930928/papers/013.pdf>).

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

95 Status of NSLS-II booster [Text] / S. Gurov, A. Erokhin, S. Karnev, V. Kiselev, E. Levichev, A. Polyansky, A. Semenov, S. Shiyankov, S. Sinyatkin, V. Smaluk, T. Shaftan, H. Hseuh // Proceedings of IPAC 2013, Shanghai, China.

96 Sugahara, Ryuhei, Masuzawa, Mika, & Ohsawa, Yasunobu (2010). Performance test of laser trackers of FARO [Text] Proceedings of the 7th annual meeting of Particle Accelerator Society of Japan.– 2010.– P. 1232. Japan.

97 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЪЕМКА УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА ВЭПП-2000 25-29 ОКТЯБРЯ 2010 ГОДА

Съемка произведена высокоточной измерительной системой API Laser Tracker 3.

За время работы выполнено три проверки точности калибровки API Laser Tracker 3. Проверка угломерной составляющей в пределах допуска. Проверка абсолютного дальномера на различных расстояниях показала незначительные отклонения от паспортных значений (не более 0,020 мм)

Выполнено шесть станций, с которых измерено положение 159 геодезических знаков.

Максимальная средняя квадратическая погрешность привязки станций 0,06 мм.

Привязки к проектному кольцу была выполнена по знакам на магнитах (исключая четвертый магнит). Знаки измерены с одной станции расположенной по центру комплекса. Среднее квадратическое погрешность привязки к проектным значениям по 12 знакам составляет $B_x = 0,165$ мм, $B_y = 0,148$ мм, $B_z = 0,174$ мм, $B_{mag} = 0,282$ мм.

Полная информация находится на ноутбуке трекера

Файл c:\Установки\ВЭПП-2000\26102010\Съемка 26102010.xit

Затрачено времени 32 часа, работало два человека.

Результаты представлены в рисунках А.1-А.4, таблице А.1.

SAViewer

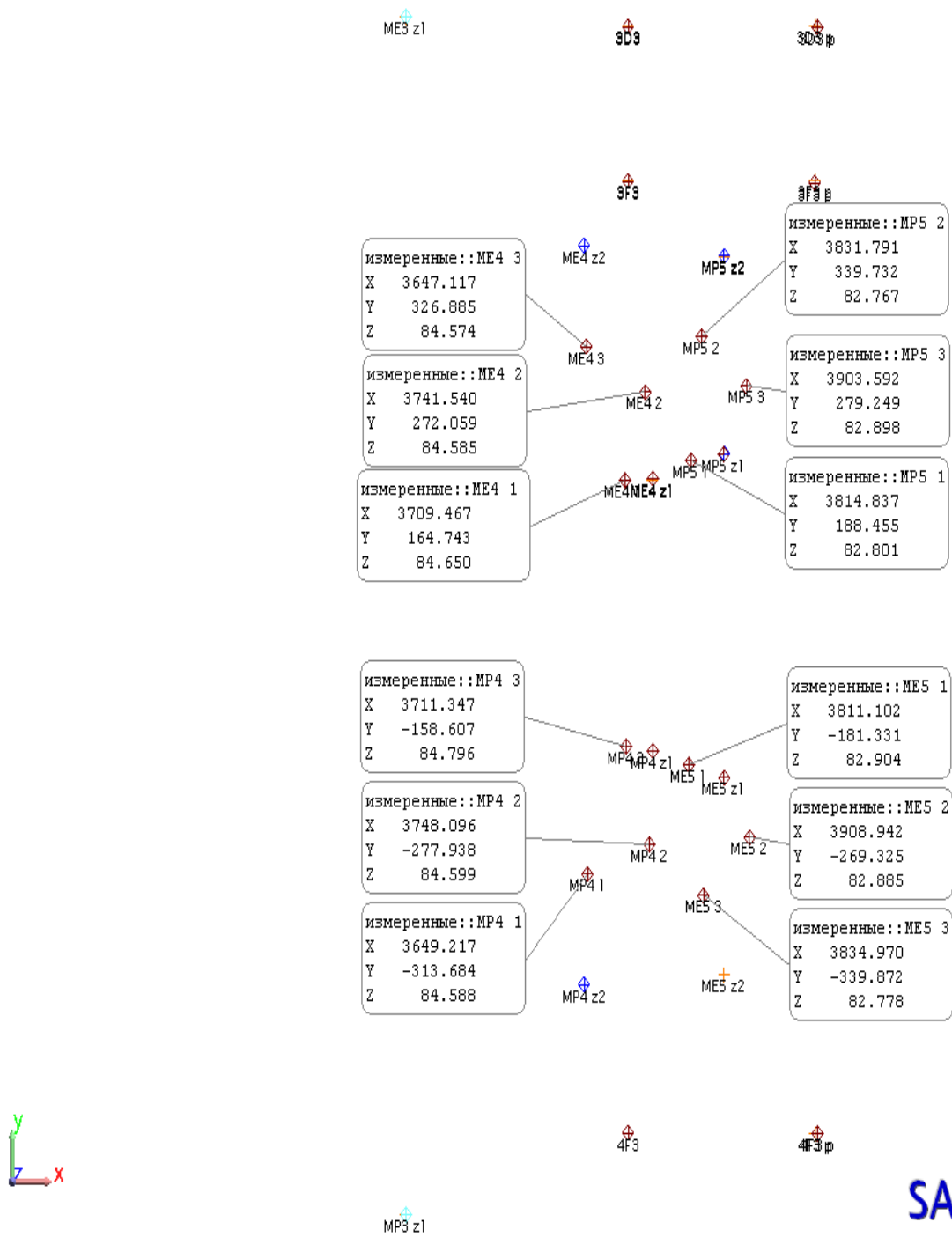
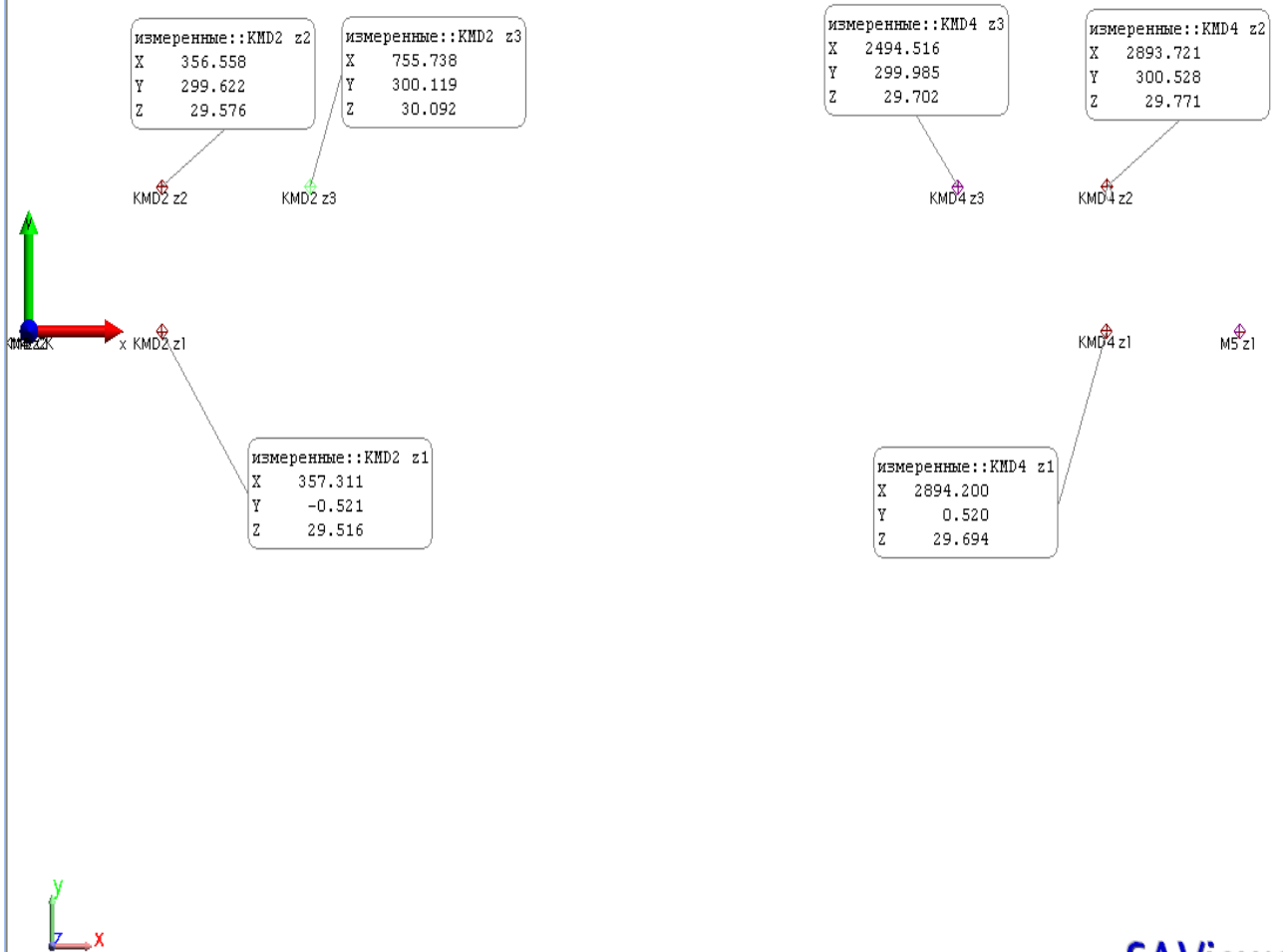


Рисунок А.2 – Результат измерений впускного промежутка

SAViewer



SAViewer

Рисунок А.3 – Результат измерений соленоидов в промежутке детектора КМД

SAViewer

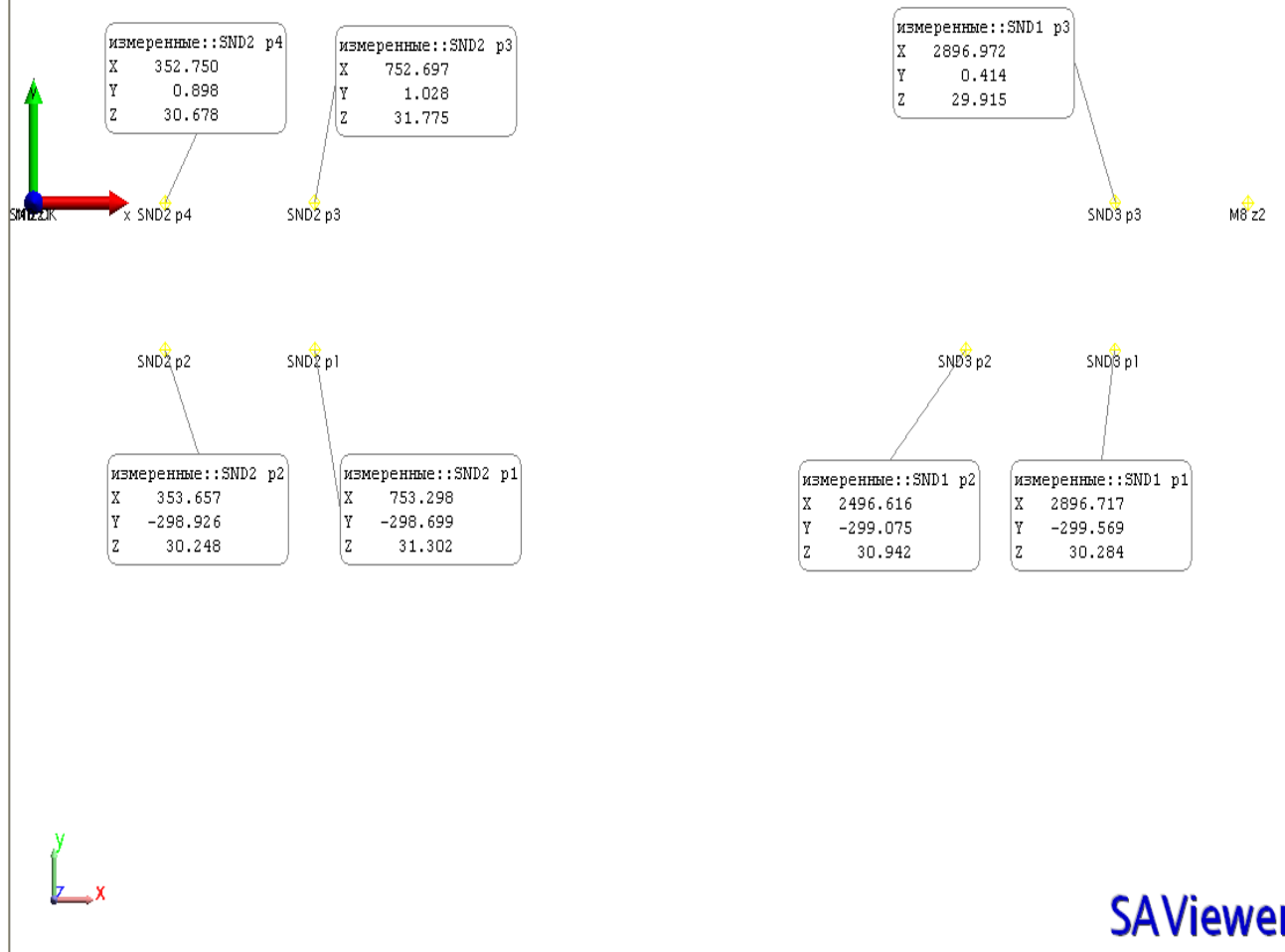


Рисунок А.4 – Результат измерений соленоидов в промежутке детектора SMD

Таблица А.1 – Отклонение геодезических знаков на элементах комплекса от проекта

VectorGroup - Обработка: Проектные пересчитанные на центр отражателя-измеренные											
Name	Begin			End			Delta			Magnitude	
	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	dX	dY	dZ		
1D2	-3206.407	-2112.417	295.440	-3206.693	-2112.431	295.297	-0.286	-0.014	-0.143	0.320	
1D3	-3714.030	-716.870	295.450	-3714.182	-716.075	295.281	-0.152	0.795	-0.169	0.827	
1D1	-2803.292	-2515.404	295.420	-2803.897	-2515.318	295.818	-0.605	0.086	0.398	0.730	
1D1 p			295.000			295.225			0.225		
1D2 p			295.030			294.755			-0.275		
1D3 p			295.100			294.826			-0.274		
1F3	-3713.990	-528.120	295.420	-3714.007	-527.612	295.270	-0.017	0.508	-0.150	0.530	
1F3 p			295.020			294.804			-0.216		
2D1	-2732.589	2586.165	295.430	-2734.153	2583.526	295.430	-1.564	-2.639	0.000	3.067	+
2D2	-3135.654	2183.128	295.430	-3137.253	2181.055	295.378	-1.599	-2.073	-0.052	2.619	+
2D1 p			295.040			295.116			0.076		
2D2 p			295.030			295.127			0.097		
2D3 p			295.020			294.887			-0.133		
2F3	-3713.990	628.090	295.420	-3713.985	628.094	295.228	0.005	0.004	-0.192	0.192	
2F3 p			295.070			294.880			-0.190		
3D1	2803.475	2515.279	295.450	2803.253	2515.447	295.476	-0.222	0.168	0.026	0.279	
3D2	3206.519	2112.221	295.400	3206.201	2112.735	295.660	-0.318	0.514	0.260	0.658	
3D3	3713.990	716.906	295.290	3713.966	715.539	295.273	-0.024	-1.367	-0.017	1.367	+
3D1 p			295.050			295.063			0.013		
3D2 p			295.000			295.249			0.249		
3D3 p			295.000			295.009			0.009		
3F3	3713.950	528.156	295.430	3713.953	527.421	295.267	0.003	-0.735	-0.163	0.753	
3F3 p			295.020			294.902			-0.118		
4D1	2732.687	-2585.995	295.340	2733.828	-2584.751	295.436	1.141	1.244	0.096	1.691	+
4D2	3135.774	-2182.980	295.420	3139.295	-2179.350	295.402	3.521	3.630	-0.018	5.057	+
4D3	3714.020	-817.014	295.420	3713.872	-816.702	295.277	-0.148	0.312	-0.143	0.374	
4D1 p			294.980			295.077			0.097		
4D2 p			295.030			294.937			-0.093		
4D3 p			295.000			294.961			-0.039		
4F3	3714.090	-628.264	295.450	3713.815	-628.245	295.313	-0.275	0.019	-0.137	0.308	
4F3 p			295.030			294.931			-0.099		
Gz1	-1615.750	0.000	-493.700	-1616.457	-0.883	-492.867	-0.707	-0.883	0.833	1.405	+
Gz2	-1956.750	324.000	-532.700	-1956.300	323.880	-532.158	0.450	-0.120	0.542	0.715	
Gz3	-1956.750	-324.000	-532.700	-1957.783	-324.177	-532.568	-1.033	-0.177	0.132	1.057	+
Gz4	-3449.350	97.000	-710.100	-3449.280	96.187	-709.680	0.070	-0.813	0.420	0.918	
Gz5	-3449.350	-97.000	-710.100	-3447.385	-97.685	-709.969	1.965	-0.685	0.131	2.085	+
Gz7	-4682.350	-126.400	-646.600	-4681.488	-127.063	-647.968	0.862	-0.663	-1.368	1.747	+
Gz8	-5272.050	227.800	-646.600	-5270.558	227.653	-647.701	1.492	-0.147	-1.101	1.860	+
Gz9	-5817.250	224.900	-646.600	-5816.553	224.630	-648.429	0.697	-0.270	-1.829	1.976	+
M1 z1	-1625.918	-3174.880	294.370	-1625.994	-3174.836	294.713	-0.076	0.044	0.343	0.354	
M1 z2	-2509.938	-2808.702	294.720	-2509.896	-2808.532	294.951	0.042	0.170	0.231	0.290	
M2 z1	-3347.736	-1970.904	294.680	-3347.846	-1970.801	294.793	-0.110	0.103	0.113	0.188	
M2 z2	-3713.920	-1086.870	294.760	-3714.286	-1086.794	294.658	-0.366	0.076	-0.102	0.388	
M3 z1	-3713.920	1086.840	294.370	-3713.770	1086.669	294.273	0.150	-0.171	-0.097	0.247	
M3 z2	-3347.715	1970.925	294.270	-3347.829	1970.908	294.201	-0.114	-0.017	-0.069	0.134	
M4 z1	-2509.980	2808.660	294.600	-2510.062	2807.974	294.972	-0.082	-0.686	0.372	0.785	
M4 z2	-1625.858	3174.880	294.580	-1625.854	3173.982	294.763	0.004	-0.898	0.203	0.921	
M5 z1	1625.874	3174.880	294.760	1625.902	3174.727	294.673	0.028	-0.153	-0.087	0.178	
M5 z2	2509.969	2808.671	294.670	2510.010	2808.571	294.589	0.041	-0.100	-0.081	0.135	
M6 z1	3347.762	1970.878	294.580	3347.565	1970.608	294.823	-0.197	-0.270	0.243	0.413	
M6 z2	3713.920	1086.906	294.160	3713.995	1086.836	294.451	0.075	-0.070	0.291	0.309	
M7 z1	3713.920	-1086.807	294.730	3713.964	-1086.717	294.563	0.044	0.090	-0.167	0.195	
M7 z2	3347.692	-1970.948	294.450	3347.822	-1970.848	294.156	0.130	0.100	-0.294	0.336	
M8 z1	2509.927	-2808.713	294.440	2510.205	-2808.473	294.458	0.278	0.240	0.018	0.368	
M8 z2	1625.934	-3174.880	294.330	1626.324	-3175.004	294.230	0.390	-0.124	-0.100	0.421	
ME1 z1	-1635.550	310.000	-410.000	-1635.900	309.673	-410.000	-0.350	-0.327	0.000	0.480	
ME1 z2	-2002.550	220.600	-452.200	-2002.778	220.744	-452.248	-0.228	0.144	-0.048	0.274	
ME2 z1	2256.650	1403.000	15.700	2257.443	1403.473	15.855	0.793	0.473	0.155	0.936	
ME2 z2	1460.450	1380.200	-59.500	1461.138	1381.045	-59.633	0.688	0.845	-0.133	1.098	+
ME3 z1	3357.050	728.000	81.900	3357.188	727.620	81.861	0.138	-0.380	-0.039	0.407	
ME3 z2	2740.350	1236.700	51.800	2740.643	1236.351	52.048	0.293	-0.349	0.248	0.519	
ME4 z1	3754.020	164.900	85.400	3753.454	166.012	85.024	-0.566	1.112	-0.376	1.303	+
ME4 z2	3643.720	448.500	85.400	3643.205	449.220	84.926	-0.515	0.720	-0.474	1.004	+
ME5 z1	3867.920	-196.600	83.400	3867.568	-196.563	83.303	-0.352	0.037	-0.097	0.367	
MP1 z1	-1635.550	-310.000	-410.000	-1635.636	-311.496	-409.943	-0.086	-1.496	0.057	1.499	+
MP1 z2	-2002.550	-220.600	-452.200	-2002.236	-220.265	-452.256	0.314	0.335	-0.056	0.462	
MP2 z1	2256.650	-1403.000	15.700	2257.070	-1402.679	16.083	0.420	0.321	0.383	0.652	
MP2 z2	1460.450	-1380.200	-59.500	1460.767	-1380.560	-58.884	0.317	-0.360	0.616	0.781	
MP3 z1	3357.050	-728.000	81.900	3357.471	-727.321	81.810	0.421	0.679	-0.090	0.805	
MP3 z2	2740.350	-1236.700	51.800	2740.730	-1236.320	52.092	0.380	0.380	0.292	0.611	
MP4 z1	3754.020	-164.900	85.400	3754.045	-164.956	85.154	0.025	-0.056	-0.246	0.253	
MP4 z2	3643.720	-448.500	85.400	3643.266	-448.192	84.971	-0.454	0.308	-0.429	0.696	
MP5 z1	3867.920	196.600	83.400	3867.387	196.913	83.284	-0.533	0.313	-0.116	0.629	
MP5 z2	3867.920	436.600	83.400	3867.532	437.030	83.178	-0.388	0.430	-0.222	0.620	