

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ГЕОДЕЗИИ И КАДАСТРА

На правах рукописи

УДК: 528.5+528.48+528.11

ШАВКАТОВА НОЗИМА ЖАМШИД КИЗИ

**«Исключение систематических погрешностей горизонтального круга
электронного тахеометра применением ряда Фурье»**

ДИССЕРТАЦИЯ

**На соискание академической степени магистра по направлению
5А311502 – “Геодезия и картография”**

Работа рассмотрена и допускается к защите

Начальник отдела магистратуры:

Ходжаев Р.М.

Зав.кафедрой:

Хамидова М.Б.

Научный руководитель:

доц. Ташпулатов С.А.

Ташкент-2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
ГЛАВА-I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННЫХ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	
1.1. Обзор разработок, исследований, путей совершенствования специализированных углоизмерительных стандов и систем.....	9
1.2. Исследования геодезических углоизмерительных приборов.....	15
1.3. Исследование погрешностей геодезических измерений и вопросы оценки точности.....	21
Выводы по главе 1.....	24
ГЛАВА-II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛОМЕРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ	
2.1. История проблемы и основы методики измерений.....	25
2.2. Разложение угломерных погрешностей в ряд Фурье.....	39
2.3. Оценка точности разложения в ряд Фурье.....	49
2.4. Подготовка и проведение экспериментов по выявлению погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами.....	54
Выводы по главе 2	66
ГЛАВА-III. АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	
3.1. Преобразование результатов измерений горизонтальных углов, полученных разными моделями электронных тахеометров в различных форматах.....	67
3.2. Анализ результатов исследований погрешностей измерения горизонтальных углов электронных тахеометров.....	71
3.3. Практическая значимость рассматриваемой работы.....	80
Выводы по главе 3.....	82
Заключение	
Список литературы	
Приложения	

ВВЕДЕНИЕ

Обоснованность темы магистерской диссертации и ее актуальность.

Во исполнение постановления Президента Республики Узбекистан от 15 июля 2008 г. № ПП-916 «О дополнительных мерах по стимулированию внедрения инновационных проектов и технологий в производство» и в целях дальнейшего оснащения (дооснащения) научным, технологическим и лабораторным оборудованием научных, научно-исследовательских учреждений и организаций Постановление Кабинета Министров «О мерах по укреплению материально-технической базы научных, научно-исследовательских учреждений и организаций»

Итогом развития геодезического приборостроения стало появление принципиально новых конструкций приборов, созданных для выполнения различных геодезических измерений. Прежде всего, к этим приборам можно отнести электронный тахеометр, обладающий следующими уникальными характеристиками: автоматизированный процесс проведения измерений, высокая точность, возможность получения результатов измерений в удобной компьютерной форме. Однако на сегодняшний день для геодезиста любой электронный тахеометр остается так называемым «черным ящиком», сохраняющим множество вопросов об особенностях его устройства, программном обеспечении, алгоритмах работы. Дальнейшее совершенствование таких угломерных приборов как тахеометр, связано с возрастающими требованиями к их точности и надежности. Возникает необходимость разработки новых методов и средств контроля их метрологических характеристик. Погрешности измерительных систем оптикоэлектронных углоизмерительных приборов имеют сложную природу и могут быть выявлены в результате экспериментальных исследований. Для достижения максимальной точности измерения горизонтальных углов точными оптическими теодолитами выполняют измерения несколькими приемами с перестановкой лимба между приемами. У современных

электронных теодолитов и тахеометров лимб не переставляется, хотя предусмотрена имитация этой операции путём высвечивания на экране любого отсчёта. Есть единственный способ применить эквивалентный перестановке лимба у оптических теодолитов способ для электронных приборов с неповторительной системой осей - переставлять между приёмами подставку на штативе (столбе). При выполнении исследований с перестановкой подставки появились неожиданные результаты и другие смежные исследования, которые легли в основу содержания диссертации.

Наиболее востребованными на сегодняшний день становятся следующие виды работ, предполагающие высокоточные угловые измерения: создание государственных геодезических опорных и специальных плановых геодезических сетей для строительства уникальных сооружений, точное вынесение и закрепление осей при строительстве, геодезический мониторинг зданий и сооружений, обеспечение безопасности эксплуатации уникальных инженерных сооружений и многое другое. Вместе с тем, наблюдается недостаточная разработанность нормативно-технической документации, включающей в себя программы и порядок исследований погрешностей измерений электронными тахеометрами. Это и определяет актуальность темы диссертационной работы.

Объектом исследования является углоизмерительные приборы.

Предметом исследования являются систематические погрешности измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами.

Основной целью работы является разработка предложений по оценке и повышению точности измерения горизонтальных углов путем исключения систематических погрешностей горизонтального круга электронного тахеометра применением ряда Фурье.

Для достижения цели исследования решаются следующие задачи:

1. Критический анализ существующих методов определения систематических погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами;

2. Применение программы для ЭВМ и базы данных, позволяющие оптимизировать процесс обработки результатов измерений горизонтальных углов, полученных разными моделями электронных тахеометров в различных форматах.

3. Вывод формул для преобразования погрешностей измерения горизонтального угла в погрешности направления для полного оборота горизонтального круга с целью оценки точности работы прибора или введения поправок в измерения.

Научная новизна. Применение ряда Фурье для аппроксимации погрешностей горизонтального круга электронного тахеометра и подбор основных гармоник ряда Фурье.

Выведение формулы преобразования погрешностей измерения горизонтального угла в погрешности направления для полного оборота горизонтального круга с целью оценки точности работы прибора и разработать порядок введения поправки в измерение углов и направлений.

Основные вопросы исследования заключается в определении систематических погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами доступным методом, последующем подборе наиболее подходящего аппроксимирующего полинома по точности для данного электронного тахеометра и разработать порядок введений поправок в измеренные горизонтальные углы для повышения точности измерения.

Гипотеза исследования. Применение ряда Фурье при исследовании горизонтального круга электронных тахеометров даёт возможность аппроксимировать погрешность горизонтального круга и представить её в виде аддитивной функции (в виде суммы случайной и систематической составляющей), что даст возможность исключить из результатов измерения горизонтальных углов систематическую погрешность.

Обзор (анализ) литературы по теме исследования. При написании данной работы будет использована научная и учебно-методическая литература, научные статьи и научные работы авторов, которые изучали

проблему ранее, прямым или косвенным образом относящихся к предмету исследования.

Вопросы исследования погрешностей горизонтального круга углоизмерительных приборов рассмотрены в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых таких как: Ташпулатов С.А., Ковалев В.И., Елисеев С.В., Литвинов Б.А., Деймлих Ф., Мещерская М.В., Красовский Ф.Н.

Вопросами оценки точности угловых измерений занимались такие научные деятели, как А.А.Изотов, Д.А.Ларин, Л.П.Пеллинен, Ф.Л.Мещанский, Ю.Б.Вировец, Л.И.Серебрякова, Л.Ю.Козлова, В.М.Зимин и другие.

Для выявления систематической погрешности могут быть применены статистические методы Стьюдента, Фишера, Аббе, приведенных в работе Рабиновича С.Г. «Погрешности измерений», а также дисперсионный, регрессионный анализы, приведенные в работах Айвязан С.А. «Статистические исследования зависимостей» и Ковтун Н.Т. «Вероятностно-статистический анализ полных поправок диаметров горизонтального круга теодолита».

Общим вопросам применения теории случайных функций для анализа погрешностей измерений посвящены работы Кондра Г.С. «Вероятностно-статистический анализ погрешности измерений», Григоренко А.Г. «Теория случайных функций ошибок измерений» и Видуева Н.Г. «Теория коррелированных случайных погрешностей измерений».

Характеристики методик, примененных в исследовании. В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с методологией исследования электронных тахеометров.

Выполняемые в диссертационной работе исследования основываются на анализе литературных данных, выполнении теоретических и практических исследований и экспериментальной проверке достоверности этих результатов.

Для решения поставленных задач будут использованы методы:

Теоретического анализа для определения проблем, формулирования гипотез и для оценки существующих методов определения систематических погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами;

Математические и статистические методы позволяют оценить результаты эксперимента, повышают надежность выводов, дают основания для теоретических обобщений, в том числе метод спектрального анализа для аппроксимации основных гармоник ряда Фурье, метод дисперсионного анализа для решения наличия систематической погрешности в результатах измерений.

Теоретическое значение результатов исследования. Материалы, полученные в ходе исследования, могут быть использованы при исследовании высокоточных теодолитов и тахеометров, а также пополнении учебно-методических комплексов по курсу «Геодезия».

Так же результаты настоящей работы могут быть применены в качестве справочного материала для последующих исследований по направлению темы диссертации или служить источником для индивидуального пополнения базы знаний.

Практическое значение результатов исследования. Разработанные предложения исследования электронных тахеометров могут быть реализованы на этапе проектирования геодезических работ для оценки точностных возможностей электронных тахеометров и выбора прибора, наиболее подходящего для данного вида угловых измерений. Введение поправок за влияние систематических погрешностей, выявленных при исследовании, позволит повысить точность измерения горизонтальных углов.

Характеристика структуры работы.

Диссертация состоит из содержания, введения, основной части (3 главы), заключения, списка использованной литературы, включающая в себя 113 источников и **Приложений**.

Введение состоит из обоснованности темы магистерской диссертации и ее актуальности, объекта и предмета исследования, целей и задач, научной новизны, основных вопросов и гипотез исследования, обзора (анализа) литературы по теме, характеристики методик, примененных в исследовании, теоретических и практических значений результатов, характеристики структуры работы.

Основная часть работы:

В первой главе приведен критический анализ нормативных документов и технической литературы относящихся к оптико-электронным углоизмерительным приборам;

Во второй главе описывается теоретические основы разрабатываемых предложений, приводя историю проблемы, обосновывая необходимость проведения исследований, описывая технологии проведения исследований угломерных погрешностей электронных тахеометров. Выполнен анализ угловых измерений погрешностей разложением в ряд Фурье, преобразования погрешности угла в погрешности измеренного направления, оценки точности разложения в ряд Фурье

В третьей главе рассматриваются результаты проведенных исследований, проводится сравнительный анализ полученных результатов, обосновывается практическая значимость результатов проведенных исследований.

Заключение состоит из обобщения итогов 3х глав и заключением полученных результатов.

Работа изложена машинописным текстом, включая 10 таблиц, 22 рисунков и 82 формулы.

ГЛАВА-I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1.1 Обзор разработок, исследований, путей совершенствования специализированных углоизмерительных стендов и систем

На сегодняшний день в сфере геодезических измерений произошел практически полный переход от оптических к оптико-электронным средствам измерений [62, 70, 86, 99]. На отечественном рынке приборов появился широкий ассортимент различных электронных нивелиров, светодальномеров, электронных теодолитов и тахеометров. Одной из самых актуальных задач является проверка их метрологических характеристик. Для ее решения ученые и инженеры в разные времена уделяли большое внимание созданию стендов и систем для исследования угломерных приборов на выявление всевозможных погрешностей измерения горизонтальных и вертикальных углов, расстояний. Этому посвящено много публикаций.

Для выполнения высокоточных геодезических угловых измерений нередко используется оптический теодолит ЗТ2КП, о чем пишут Н.Х.Голыгин, В.А.Шилин [31]. При его использовании повышение точности достигается в основном увеличением количества приемов, что, в свою очередь, значительно снижает производительность работ. Повысить производительность работ можно с помощью автоматизации измерений электронными тахеометрами [7, 8, 9, 10, 11]. В данной системе на точность выполняемых работ влияют определенные факторы: квалификация наблюдателя, погрешности прибора, внешние условия, метод измерений [64, 73, 87, 98]. В электронных тахеометрах заложена осевая система, которая имеет погрешность измерения порядка 5" и более [31]. В качестве многозначной меры угловых измерений используются штриховые растры, имеющие период $T \geq 20$ мкм. Это в угловой мере при диаметре растрового диска в 100 мм составляет примерно 80". Технологически затруднено уменьшение периода растров, которые изготовлены традиционными

методами. Уменьшение шага квантования в дальнейшем осуществляется с помощью интерполяции измерительных сигналов. Коэффициент интерполяции ограничивает наличие в функции пропускания растрового сопряжения высших гармоник. Приборная (инструментальная) погрешность растрового преобразователя характеризуется погрешностью деления штрихов, погрешностью заданного смещения дорожек, погрешностью ширины штрихов, погрешностями эксцентриситета измерительного и индикаторного растров.

Анализ использования современных электронных тахеометров показал, что погрешности измерений достигают более высоких значений, чем величины, заложенные на стенде по данной методике. В измерительных системах преобладающей составляющей суммарной погрешности служит внутришаговая погрешность интерполяции электрических сигналов.

В [41] Г.В.Жеболдов, Ю.Б.Парвулюсов рассматривают проблемы автоматизации процесса аттестации лимбов высокоточных углоизмерительных приборов. Авторы предлагают некоторые принципы построения автоматизированного стенда для аттестации приборов, измеряющих углы. Эти принципы основаны на применении электронно-вычислительных средств, которые обрабатывают результаты измерений, снимаемых одновременно с датчиков углов стенда и теодолита. Теодолит при этом измеряет несколько фиксированных направлений, отличающихся углом возвышения, а также на разработанном авторами статьи математическом аппарате, отвечающем следующим требованиям: возможность контроля приборов с требуемой точностью; возможность учета взаимного влияния составляющих погрешностей; техническая реализуемость модели.

Прибор для измерения угловых погрешностей лимбов и растровых дисков рассматривает в публикации [72] А.И. Разумовский. Автор приводит метод измерения погрешности лимбов и растровых дисков посредством

сравнения с двумя эталонными углами. Анализируются источники погрешностей измерений и различные пути уменьшения их влияния.

Особенно интересна технология проектирования и производства электронных тахеометров. Бушко Малгорзата обсуждает принципы работы инновационных устройств и механизмов, применяемых в проектировании тахеометров последнего поколения: механизмов компенсации наклонов вертикальной оси, системы автоматического наведения на отражатель, траектория перемещения поворотной призмы и возможности измерений электронным тахеометром без рефлектора [110]. Всё вышеперечисленное основывается на тахеометрах, производимых фирмой Topcon [9], и проверено в лабораторных условиях.

Одним из важных требований при угломерных измерениях, как пишут С.П. Буюкян, М.В. Безматерных [19], помимо высокой точности в пределах долей угловой секунды, является требование автоматизации и увеличение оперативности и надежности измерений. С этой целью был разработан в

ФГУП «ГСПИ» Минатома РФ для решения ряда специальных задач видеоавтоколлиматор ВАК 0,1. Этот автоколлиматор относится к новому классу, основанному на видеоизмерениях - измерениях, базирующихся на компьютерной обработке видеоизображения в видеокадре тест-марки. Видеоавтоколлиматор содержит объектив и светоделительную куб-призму, склеенную с тест-маркой, которая подсвечивается полупроводниковым светодиодом, и ПЗС-матрицей с модулем электроники в виде малогабаритной печатной платы. Следовательно, в нем нет привычных для цифровых автоколлиматоров узлов - оптических компенсаторов и соответствующих электроприводов. Измерения в видеоколлиматоре производятся посредством компьютерной обработки видеоизображения тест-марки в видеосигнале, который был заранее преобразован в видеопроцессоре из аналоговой в цифровую форму. В статье [19] представлены результаты исследования видеоавтоколлиматора.

Созданием разнообразных устройств для поверки и калибровки электронных тахеометров занимались многие ученые в разных странах мира. Брукас Домантас, Гиниотис Витаутас, Петроскевичес Петрас говорят о принципе действия электронных тахеометров, основанном на точном измерении плоских углов [105]. Поверка и калибровка угломерных кругов тахеометров является довольно сложной технической задачей. В статье описано и предложено новое устройство для поверки и калибровки угломерных геодезических приборов.

А.М. Назаров, Ю.В. Томахин разработали портативные метрологические стенды для поверки геодезических инструментов [65]. Ими были созданы стенды для метрологической поверки геодезических приборов: линейных, коллиматорных, высотных, центрировочных. Преимущество разработанных поверочных стендов заключается в том, что их легко изготовить, они легко разбираются, небольшого размера, быстро и легко доставляются в места, где необходимо проведение поверок, а также требуется минимум работ при их монтаже.

В институте геодезии при Вильнюсском техническом университете им. Гедиминаса разработан стенд для калибровки угломерных геодезических инструментов. Авторы статьи Брукас Домантас, Гиниотис Витаутас, Скивалас Джонас приводят подробное описание принципа работы данного стенда [106].

На стенде размещено некоторое количество приспособлений для измерения плоскостного угла: фотоэлектрический угловой преобразователь, визуальный лимб-микроскоп, полигон автоколлиматор. Широкий ряд применяемых приспособлений на стенде позволяет делать перекрестное калибрование и при помощи одних приспособлений следить за работой других. Кроме того, созданный стенд позволяет использовать разнообразные методы калибровки и контроля. В статье приводится корреляционный и ковариационный анализ результатов, полученных в процессе измерений, проведенных на вышеупомянутом стенде.

Большинство геодезических приборов, в том числе и электронные тахеометры, применяются в геодезии, машиностроении и других сферах, предназначенных для точного измерения плоских углов [18, 90]. В статье [109] Брукас Домантас, Гиниотис Витаутас приводят результаты исследования точности станда, предназначенного для калибровки приборов, измеряющих плоские углы. Описаны результаты исследований круговых шкал

Основные принципы построения высокоточного станда приводят в статье [66] Ю.Б. Парвулюсов, Б.В. Гончар. Они пишут о разработанном в МИИГАиКе методе аттестации углоизмерительных приборов. Стенд обладает высоким уровнем стабильности метрологических характеристик. Авторы рассматривают пути решения вопроса учета нестабильности метрологических характеристик этого станда.

Эталонный стенд и технологии исследования короткопериодической погрешности измерения вертикальных углов геодезическими приборами описывает в автореферате [95] С.В. Травкин. Также им представлена разработка и исследование методики поверки и калибровки системы лазерного трекера для измерения превышений и вертикальных углов на эталонном станде [16, 49].

Исследования случайных и систематических погрешностей оптических датчиков угла рассматривает в [13] Е.А. Барина. Автор описывает разработанную методику уменьшения случайных погрешностей оптических датчиков угла и методику повышения точности лазерной гониометрической системы. Проведена экспериментальная апробация предложенных методов. В работе представлен метод вычисления перекрестных систематических погрешностей точного автоколлиматора.

В публикации [23] Н.Х. Гольгин, Н.В. Салуни, В.А. Шилин описывают принципы работы и преимущество преобразователя положения визирной системы, основываясь на координатно-чувствительном приемнике излучения. Координатный приемник излучения при обработке сигналов

выполняет два назначения. Он одновременно выступает приемником излучения и анализатором изображения. Источником излучения в вышеупомянутой системе служит полупроводниковый лазер, который устанавливается внутри всех современных геодезических инструментов. Лазер предназначен для наведения на объект. Вся эта установка необходима для того, чтобы при поверке геодезических приборов на поверочном стенде была возможность с необходимой точностью установить визирную систему прибора в заданное положение.

Аналізу также подвержены оптико-электронные приборы, применяемые для наблюдения за перемещениями объектов в пространстве. В.П. Солдатов, Ю.А. Фотиев пишут про оптико-электронные приборы, применяемые для измерения небольших перемещений наблюдаемых объектов [80]. Необходимо это для контроля непрямолинейности направляющих, провешивания направлений, выравнивания некоторых узлов и деталей приборов, смещений объектов, их вибраций и решения других аналогичных задач. Среди таких приборов наиболее простыми и недорогими являются фазовые устройства с дисковыми, барабанными и линейчатыми растровыми анализаторами изображений. Главными погрешностями таких измерителей, которые влияют на точность измерений, являются частные погрешности из-за нестабильности периодов раstra анализаторов изображения.

Способ ослабления влияния угловых наклонов коллиматоров на точность его малых линейных перемещений предложили А.В.Белозеров, В.П.Солдатов в [15]. Здесь учитывается размер диафрагмы коллиматора, неравномерность яркости его излучения. В результате чего для обеспечения заданной точности необходимо установить допуски на неравномерность распределения яркости диафрагмы коллиматора и учесть максимально допустимый угол наклона коллиматора, а также заданную погрешность измерений, выбрать соответствующий излучатель. В [15] рассматривается возможность уменьшения влияния поворотов коллиматора на точность

измерения угловых и линейных величин, таких как несоосность объектов, коллимационным способом.

1.2 Исследования геодезических углоизмерительных приборов

В работах отечественных и зарубежных ученых большое внимание уделено исследованиям существующих приборов для измерения углов [14, 25, 45, 51, 54, 55, 58, 61]. Все работы посвящены проверке работоспособности таких приборов и систем заявленным техническим характеристикам и параметрам. В каждой опубликованной работе акцентируется внимание на определении зависимости точности измерений горизонтальных и вертикальных углов, расстояний от внешних и внутренних факторов, влияющих на прибор, его конструктивных особенностей.

Х.К. Ямбаев в книге [99] (стр. 454) пишет о том, что проведенный анализ научно-технической литературы и патентно-технической информации подтверждает, что, несмотря на большое число разработок в области эталонирования высокоточных геодезических приборов для измерений углов, остаются актуальными вопросы разработки и создания лабораторного метрологического оборудования. Оно вместе с обеспечением высокой точности измерений позволит исследовать прибор в собранном виде с целью определения функции поправок, корректирующей влияние систематических инструментальных погрешностей. Особенно актуальным на сегодняшний день Х.К. Ямбаев считает автоматизировать во время исследования приборов процесс передачи информации от эталона и исследуемого прибора в компьютер с последующей обработкой полученной информации. Автор книги считает, что это позволит обрабатывать большие объемы данных с целью оптимального выбора вида функции поправок, экономии времени и исключения случайных погрешностей оператора.

В статье [113] Х.К. Ямбаев, М.М. Карсунская предлагают математическую модель функционирования системы угловых измерений оптикоэлектронных тахеометров Та3М и 2Та5, которые производятся

Уральским оптико-механическим заводом. В этих тахеометрах используется растровый метод отсчетов по разделенному кругу. Метод включает сканирование диаметрально противоположных штрихов, изображения которых помещены в общем поле зрения, а результат отсчета представлен в цифровом виде целых шагов раstra и его дробных ($1/4$) частей. Такие отсчеты подвержены погрешностям рена, разъюстировки системы, эксцентриситета алидады, а также погрешностям квантизации, исходящим из процедуры аналогового - цифрового преобразования. Еще имеется ряд погрешностей, связанных со свойствами оптических элементов системы. Приведены выводы формул, связывающие положения штрихов разделенного круга с их растровыми изображениями, на основе чего может быть выполнена оценка вышеперечисленных погрешностей. Составлена компьютерная программа, алгоритм которой трактуется как модель рабочей системы. Выполнен эксперимент, результатом которого является оценка погрешностей. В книге [99] Х.К.Ямбаев использует разложение в ряд Фурье погрешностей деления горизонтального круга.

Немало внимания в специализированной литературе уделяется исследованиям электронных датчиков. В [52] М.М.Карсунская, Х.К.Ямбаев сравнивают результаты экспериментальных исследований с итогами математического и имитационного моделирования систематических приборных погрешностей датчика направлений тахеометра ТаЗМ. Рассматривается возможность использования имитационного моделирования для определения причин появления и характера проявления приборных погрешностей как в их совокупном влиянии друг на друга, так и по отдельности. Выведены формулы вычисления погрешности измерения за рен в системе датчика электронного тахеометра ТаЗМ. В статье [53] М.М.Карсунская, Х.К. Ямбаев приводят сравнительную характеристику систем абсолютного отсчитывания направлений и анализируют основные принципы их построений. Приводятся результаты исследования систематических погрешностей в системе отсчитывания горизонтальных

углов тахеометра Elta 4. Путем анализа полных погрешностей с использованием функции автокоррекции определяются периоды отдельных слагающих синусоид систематических погрешностей датчика направлений, а затем результаты измерений аппроксимируются тригонометрическим полиномом. В исследовании [51] отмечается, что систематические составляющие приборных погрешностей, такие, как периодические погрешности нанесения штрихов и погрешности интерполяции в оптико-электронных отсчетных системах, могут быть промодулированы с помощью рядов Фурье. Для автоматизации исследования погрешностей интерполяции в отсчетных системах предлагается использовать цифровой коллиматор.

Необходимость учета систематических погрешностей углоизмерительных устройств подтверждают С.М. Корнеев, О.Ю. Дорофеева в своей работе [57]. Ими разработана методика учета систематических погрешностей осевых систем углоизмерительных приборов, которые не имеют возможности перевода через зенит визирной оси. Данная методика предполагает ввод поправок за систематические погрешности по результатам измерения направлений на коллиматоры, которые установлены под различными углами в двух взаимно перпендикулярных вертикалях. Авторами статьи установлена связь между точностью определения соответствующих поправок и погрешностью определения угловой координаты объекта в поле углоизмерительного прибора. С помощью приведенных в статье формул можно определить точность измерения угловых координат в поле, необходимую для обеспечения требуемой точности введения поправок.

Периодически проводятся лабораторные и полевые испытания электронных тахеометров. Так в [14] Ю.Г. Батраков, П.А. Докукин, А.В. Кокорев, А.М. Лебедев, С.В. Шендяпина пишут о проведенных в ЦНИИГАиК лабораторных исследованиях электронного тахеометра 3Та5 и полевых исследованиях на Чкаловском геодезическом полигоне ГУЗ. В лабораторных условиях на компараторе были проверены дальномер прибора,

а на автоматизированном рабочем месте исследованы точность горизонтальных и вертикальных углов. На Чкаловском геодезическом полигоне были исследованы точность измерения расстояний, горизонтальных и вертикальных углов, определены площади земельных участков и высоты недоступных точек. В статье приведены результаты проведенных экспериментов. Сделаны выводы о надежности измерений электронного тахеометра 3Та5.

Во время эксплуатации электронных тахеометров их метрологические характеристики и параметры изменяются. Эти изменения могут быть случайными, монотонными или флуктуирующего характера, которые приводят к отказам в работе, то есть снижению надежности [81, 82, 88, 91]. При определении данной оценки для нового прибора, как пишут в статье [50] Л.Н.Калюжина, В.А.Калюжин, требуется большой объем информации, который накапливается на основе результатов метрологической аттестации или при производственных испытаниях. В связи с этим авторы статьи предлагают выполнять экспрессоценку надежности и устойчивости электронных тахеометров с помощью относительного коэффициента. Такой коэффициент предлагается определять как отношение векторов параметрических оценок (коэффициент энтропии и контр-экспресс) законов распределения погрешностей измерений, полученных в лабораторных и производственных условиях. На протяжении многих лет авторы статьи выполняли подобные исследования на эталонном базисе СГГА. Был протестирован ряд приборов. Отечественные электронные тахеометры (Та3М, 2Та5, ТС600Е), как показали исследования, устойчивы к внешним воздействиям. Погрешности измерений, произведенных как в полевых, так и в лабораторных условиях, подчинены нормальному закону распределения. Импортные электронные тахеометры (ТС1610, SET4000, Geodimeter610) устойчивы, но наиболее чувствительны к внешним условиям. В лабораторных условиях приборы генерируют погрешности измерений,

подчиняющиеся нормальному закону распределения, а в полевых - экспоненциальному.

В статье [110] Багдзинат Рената обращает внимание на специфические погрешности, которые появляются при измерении электронными тахеометрами строительных объектов с высокой точностью. Подчеркивается значимость этих погрешностей, а также исследованы способы их исключения из результатов измерений. Все приборы разделены по группам в зависимости от геометрического положения их важнейших осей, измерительной линии и точек. Оси приборов подразделяются на следующие: визирная ось посылаемого сигнала, возвращающегося от отраженной поверхности; ось сигнала, линия измерения; ось прибора; геометрическая точка визирования; истинная точка визирования. Большинство погрешностей измерения зависят от геометрического положения этих осей относительно друг друга. В работе исследованы наиболее часто встречающиеся случаи. Вертикальный эксцентриситет характеризуют константа прибора, влияющая на погрешность измерений расстояния, зенитный угол, визирная ось. Автор делает выводы, что погрешности расстояния больше, когда ось наклонена в сторону от измеряющего, а не когда она наклонена в сторону измеряющего. Представлены формулы для пересчета координат.

Лазерное устройство Smart 310 фирмы Leica, которое применяется для калибровки штрихов разделенных кругов электронных тахеометров, может выявить систематические погрешности, вызванные смещением от их истинного положения, тепловых влияний и влияний эксцентricности [115]. Калибровка выполняется следующим образом. Устройство Smart 310 устанавливается на близком (около 750 мм) расстоянии от исследуемого тахеометра, излучает лазерные импульсы с частотой 0,5-1 кГц, которые улавливаются отражающей призмой, установленной на окуляре зрительной трубы тахеометра, сопровождающего визирную цель, также имеющую отражающую призму. При помощи системы зеркал лазерный импульс, поступивший на окулярную призму, попадает на разделенный круг и,

отразившись от него, принимается обратно устройством Smart 310. По времени распространения импульса вычисляются расстояния от Smart 310 до отражателей, один из которых крепится на корпус тахеометра, второй - на окуляре зрительной трубы. По разности этих расстояний вычисляется длина хорды круга, центр которого находится в точке пересечения осей прибора и радиусом, определяющимся от этого центра до точки установки окулярной призмы.

Крикел Бернд в своей диссертации на соискание ученой степени доктора инженера [103] приводит сравнительные характеристики механических и автоматизированных электронных тахеометров. Автор подробно рассматривает функциональные возможности работы тахеометров таких фирм, как Leica TPS, Trimble (Zeiss) Elta S, Geodimeter, Topcon. Представлены основные критерии их работы, используемые в настоящее время, и требования к составлению новых критериев. Полярными измерительными системами являются геодезические приборы, измеряющие полярные координаты (расстояния, горизонтальные и вертикальные углы и направления) визирных целей в местной системе отсчета с началом в точке стояния инструмента. Такими приборами могут быть теодолит, тахеометр, лазерный сканер и т.д. Основываясь на точной формуле Stahlberg (1997 г.), которая связывает наклоны горизонтальной оси i относительно местного горизонта и вертикальной оси с отвесной линией с отсчетами по горизонтальному и вертикальному разделенным кругам при наблюдениях визирной цели, в статье [110] Нейтзен Франк представляет метод определения наклонов по наблюдениям визирных целей, которые устанавливаются на различных уровнях отметок относительно точки стояния прибора, при положении зрительной трубы круг право и лево. Автор рассматривает два случая таких определений. Первый заключается в минимальной конфигурации, при которой ведется наблюдение за двумя визирными целями. В этом случае определение значений i и c выполняется по формулам, инвертированных из формул Stahlberg. Вторым случаем

содержит избыточную конфигурацию, в которой применяется наблюдение большего количества визирных целей. При этом задача оценки наклонов решается по линеаризованным инвертированным формулам методом наименьших квадратов.

1.3 Исследование погрешностей геодезических измерений и вопросы оценки точности

Оценка точности результатов геодезических измерений - один из самых важных этапов получения достоверных геодезических данных. Надежная оценка точности - обязательный показатель при сертификации и метрологии геодезических приборов [25, 56, 59, 71, 76, 83]. В программное обеспечение многих современных электронных геодезических приборов внедрена методика уравнивания и оценки точности измерений. Об этом писали Л.И.Серебрякова, Л.Ю.Козлова [74]. Но эти вычислительные операции не обладают «прозрачностью», что не позволяет быть уверенным в объективности полученных результатов измерений и адекватной оценке точности [63]. Для стопроцентной уверенности необходимо произвести дополнительные исследования приборов.

Вопросами оценки точности угловых измерений занимались такие научные деятели, как А.А. Изотов, Д.А. Ларин, Л.П. Пеллинен, Ф.Л.Мещанский, Ю.Б. Вировец, Л.И. Серебрякова, Л.Ю. Козлова, В.М. Зимин и другие [46, 60, 68, 74]. «Вопрос о точности измерений и ответ на этот вопрос является началом и концом всех точных геодезических измерений» - эти слова Иордана были выбраны В.М. Зиминим в качестве эпиграфа своей статьи [47]. Много ценной информации о точности угловых измерений отразили в [23] Д.А.Аникст, К.М.Константинович, И.В.Меськин.

Современное выполнение геодезических измерений предполагает увеличение требований по обеспечению точности измерений [46, 47, 74]. На сегодняшний день опубликовано огромное количество статей, в которых описаны источники погрешностей геодезических измерений и их

составляющие [85, 108]. В публикации [94] О.Б. Хиноева обращает внимание на три пути, по которому идут исследования в этой области. Первый путь – это учет систематической погрешности по результатам поверки геодезического прибора. Второй путь - это создание математической модели. Третий путь – это создание искусственных нейронных сетей. Автор статьи для себя определила третий путь основным для исследований. Она считает его достаточно инновационным в сфере приборостроения. В статье говорится про однослойную нейронную сеть, которая имеет всего один слой нейропроцессорных элементов. Обучение сети заключается в подстройке весовых коэффициентов каждого нейрона. Правильные выходные значения состояния нейронов единственного слоя заведомо известны, а подстройка синоптических связей идет в направлении, минимизирующем погрешность при выходе сети, тогда этот алгоритм обучения будет относиться к классу алгоритмов с участием. В работе приводятся результаты экспериментов по исследованию погрешностей эксцентриситета алидады горизонтального круга для теодолита 2Т2. По результатам экспериментов построены графики, которые наглядно показывают высокую точность аппроксимации. Применение алгоритмов нейропрограммирования способствует уменьшению времени вычислений, дает возможность быстрее рассчитать значение весовых коэффициентов и порогов сети, минимизирующих целевую функцию.

В [12] А.В.Астапович отмечает, что в триангуляционном уравнивании на разных этапах математической обработки результатов измерений оценка точности направлений не может быть одинаковой, так как каждый раз оценивается влияние различных источников погрешностей на точность измерений. Невязки в треугольниках порождаются случайными, остаточными систематическими и скрытыми погрешностями. Также автор статьи пишет, что после уравнивания на станции точность угловых измерений оценивается по внутренней сходимости, то есть по формулам, использующим отклонения от среднего. Автор также приходит к выводу, что

оценка точности по внутренней сходимости характеризует влияние только случайных погрешностей на точность измерений. При уравнивании угловых величин используются соответствующие ковариационные матрицы. В таком случае не рассматривается влияние погрешностей центрировки и редукции, боковой рефракции и многих других источников погрешностей, которые не зависят от временной переменной.

В классической теории математической обработки геодезических измерений мало внимания уделяется поиску грубых погрешностей измерений. Об этом писал М.Д. Герасименко [24]. Считается, что грубые погрешности должны быть выявлены и исключены еще до уравнивания применением необходимой методики измерений и наличием избыточных измерений. В связи с появлением автоматизации сбора и математической обработки огромного массива измеренной информации, проблема выявления грубых погрешностей стала еще более остро. Эти массивы в ручную не анализируются, и в окончательную обработку поступают измерения, которые содержат грубые погрешности. Их количество не велико и оценивается в пределах от 0,1 до 1 % от общего числа измерений [100].

В настоящее время исследования погрешностей геодезических измерений и вопросы оценки точности являются актуальными. Современное производство геодезических измерений предполагает увеличение требований по обеспечению точности. Все исследования в области повышения точности геодезических измерений развиваются в одном из трех направлений:

- учет систематических погрешностей по результатам поверки геодезических приборов;
- создание математической модели;
- создание искусственных нейросетей.

Каждый исследователь должен для себя определить, в каком из трех направлений он будет производить исследования. Таким образом, чтобы правильно выполнить оценку точности геодезических измерений, необходимо оценить возможность влияния различных источников

погрешностей на точность измерений. Рассматривают случайные, остаточные систематические и скрытые погрешности. Грубые погрешности должны быть выявлены и исключены из обработки еще до уравнивания применением необходимой методики измерений и наличием избыточных измерений. Систематические и скрытые погрешности должны быть учтены при обработке окончательного результата.

Выводы по главе 1

Достаточно большое число научных работ по теме диссертационного исследования говорит об актуальности темы и ее важности. Авторитетными учеными проведены исследования с электронными тахеометрами на предмет выявления погрешностей измерений и причин их возникновения. Предлагаются различные стенды, системы и методики для исследований. На сегодняшний день проведены эксперименты с большим количеством приборов, выявлено много зависимостей точности получаемых результатов от методик измерений, ввода коэффициентов в измерения, обработки полученных данных. Но все они не позволяют проводить исследования погрешностей измерения электронными тахеометрами в условиях отсутствия специальной лаборатории. Избранная тема мало изучена, соответственно мало публикаций, напрямую относящихся к ней.

Некоторые специалисты прямо говорят, что никаких упругих деформаций деталей прибора быть не может. Поэтому, доказывая факт наличия упругих деформаций в подставке электронных тахеометров, напрямую влияющих на точность измерения горизонтальных углов в результате проведенных исследований, автором выбрана тема, в которой присутствует новизна и актуальность. В первом разделе содержится материал, анализ которого послужил поводом к проведению данных исследований. При обзоре литературных источников приводятся близкие к теме диссертации материалы, послужившие также источником для постановки вопросов, рассмотренных в диссертации.

ГЛАВА-II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ УГЛОМЕРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ

2.1. История проблемы и основы методики измерений.

Исследования оптических теодолитов и электронных тахеометров показывают, что результаты измерений одного и того же угла, полученного на разных участках лимба, несколько различаются между собой [44].

Наглядным примером таких погрешностей служили первые гирокомпасы 15Ш29, изготовленные для Министерства обороны СССР в г. Киеве, затем в г. Бердске в 70-х годах XX века. При паспортной точности определения астрономического азимута гирокомпасом в 5 дуговых секунд, погрешности измерения углов некоторых приборов достигали 30-40 секунд. Выяснилось, что у этих приборов при вращении алидады имели место упругие азимутальные деформации деталей, несущих стеклянный лимб. Указанные погрешности не имеют ничего общего с известными погрешностями увлечения горизонтального круга, погрешностями делений лимба или погрешностями за эксцентриситет алидады (горизонтального круга).

Погрешности были выявлены при измерении одного и того же угла (около 90°) на разных участках лимба путём разворота прибора на штативе между приёмами на 30° . У гирокомпаса неповторительная система осей, поэтому переставлять лимб между приёмами известным способом не представлялось возможным. Погрешности носили гармонический характер и имели период 180° , поэтому в одном полном обороте укладывалось 2 синусоиды графика погрешностей. Это было непонятно, потому что теоретически проще было обосновать наличие упругих деформаций с периодом не 180° , а 360° .

Для выявления причины появления погрешностей измерения на заводе-изготовителе при активном участии руководителя диссертации Ч.Н. Желтко

были проведены исследования прибора [42]. Для этого верхняя часть гирокомпаса вместе со зрительной трубой и подставками трубы были сняты. У оставшейся части сверху располагался стеклянный круг и кольцо алидады, к которому крепятся снятые части. Кольцо алидады вращается вокруг подставки прибора на шарикоподшипнике диаметром около 20 см. Шарикоподшипник с целью устранения люфта был установлен с натяжением. Он заменяет вертикальную ось прибора и обеспечивает вращение алидады вокруг вертикальной оси. На лимб прибора было установлено оптическое зеркало, через которое в зрительной трубе установленного рядом теодолита (рис. 2.1) с автоколлимационной зрительной трубой была видна отражённая сетка нитей. Затем кольцо алидады гирокомпаса поворачивалось на разные углы и фиксировалось положение отражённой от зеркала автоколлимационной сетки относительно собственной сетки теодолита. Выяснилось, что при вращении кольца алидады отражённая сетка описывает эллипс близкий к окружности с диаметром в несколько десятков дуговых секунд (рис. 2.2). Это означало, что при вращении алидады лимб не неподвижен, а испытывает весьма заметные колебания вокруг горизонтальной и вертикальной осей. При полном обороте кольца алидады на 360° отражённая сетка проходит по эллипсу 2 раза.

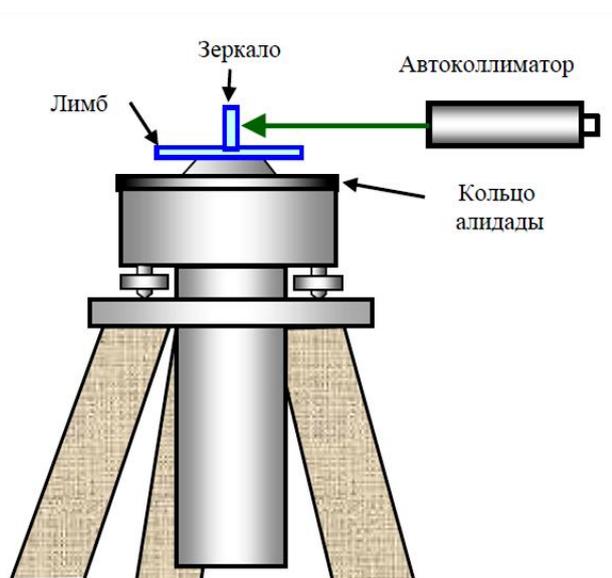


Рис. 2.1. Схема исследования гирокомпаса (красный эллипс) [42].

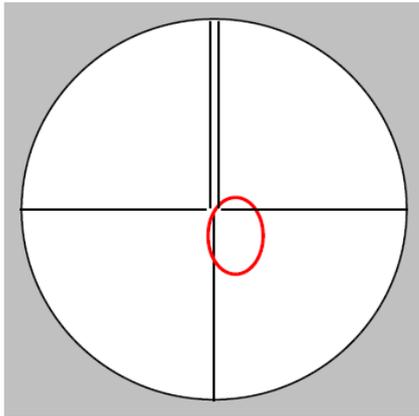


Рис. 2.2. Перемещение отражённого от зеркала перекрестия сетки (красный эллипс) [42]

Разработчики прибора и завод-изготовитель быстро устранили причину этих погрешностей, значительно уменьшив натяжение шарикоподшипника.

Хотя у оптических теодолитов такого шарикоподшипника нет, но подобные упругие деформации у них тоже могли быть. Для выяснения этого вопроса позднее были выполнены подобные исследования оптических теодолитов. Сохранились журналы измерений для 16-ти теодолитов

типа ОТ-02М, Т2 и ТНЕО-010. Автор диссертации обработал большой объём этих измерений и построил графики погрешностей. Для 2-х теодолитов, где эти погрешности видны наиболее ярко, результаты представлены на рисунках 2.3 и 2.4. Характерно, что для теодолитов (7 шт.) ТНЕО-010 (двухсекундные теодолиты бывшей ГДР) эти погрешности практически незаметны.

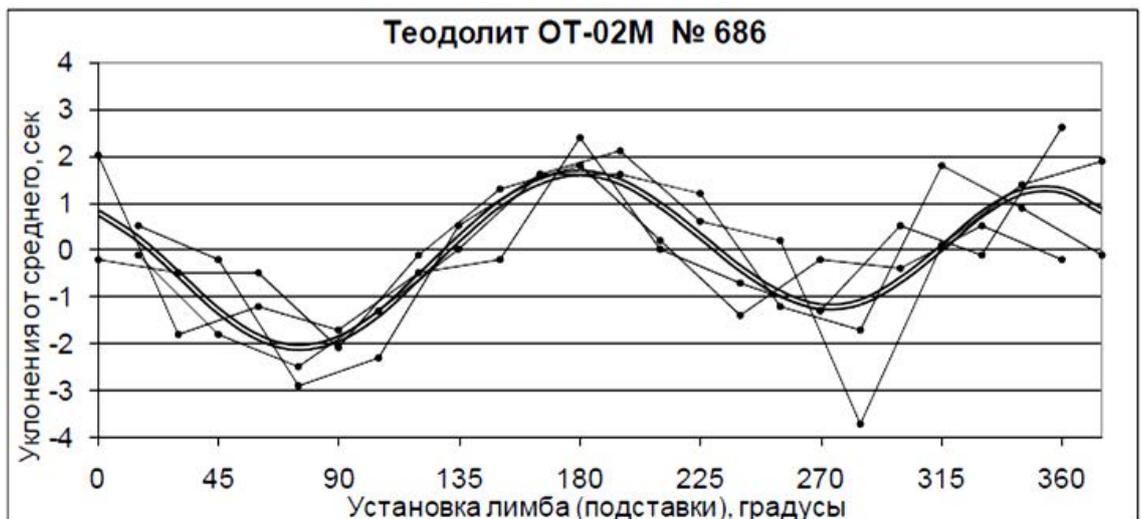


Рис.2.3 – Угломерные погрешности теодолита ОТ-02М

При исследованиях измерялся горизонтальный угол 13-ю приёмами с перестановкой подставки между ними через 30° . Угол составлял 46° . Одна серия из 13 приёмов выполнялась на установках подставки $0^\circ, 30^\circ, \dots, 360^\circ$, вторая серия - на установках $15^\circ, 45^\circ, \dots, 15^\circ$. Всего 52 полуприёма (26 приёмов), результаты которых (отклонения от среднего угла) показаны точками на рисунках. Красным цветом показан полином 8-го порядка для теодолита ОТ-02М и 10-го порядка для теодолита Т2, наилучшим образом проходящие вблизи точек.

Исследования показывают, что у теодолита ОТ-02 имеют место погрешности с периодом 180° , подобные погрешностям гироскопа. У теодолита Т2 период погрешностей 120° , что может быть следствием упругих деформаций в подъёмных винтах. Возможно, на эту гармонику накладывается гармоника с другим периодом, потому что 3 максимума на графике не одинаковы.

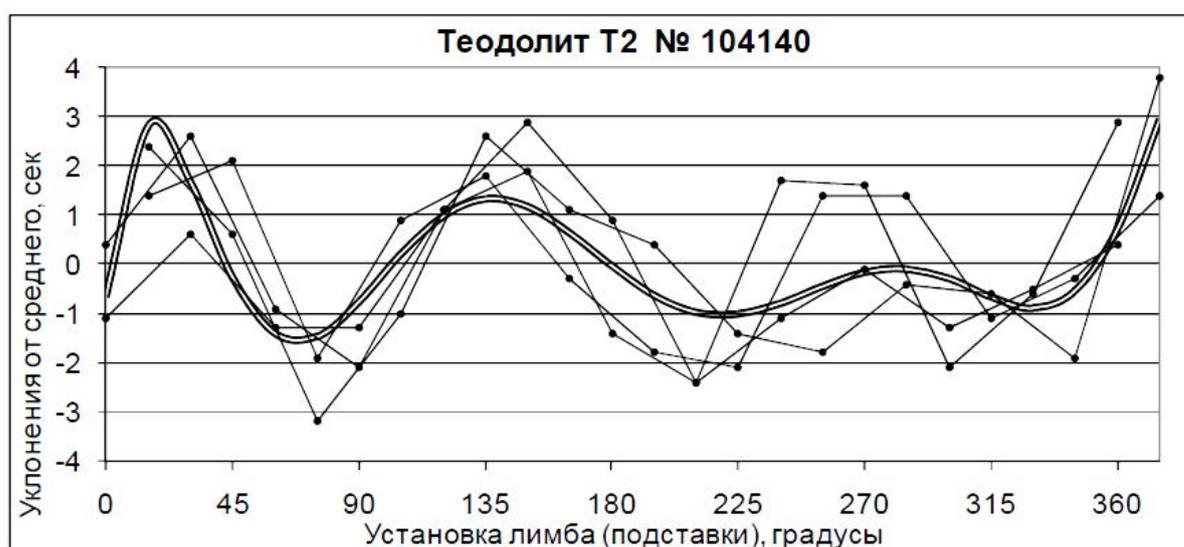


Рис.2.4 – Угломерные погрешности теодолита Т2

В свою очередь в диссертации Ташпулатова С.А. рассмотрен пример применения теории случайных функций и гармонического анализа при исследованиях полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита Т2.

Случайные погрешности измерений могут обладать разнообразными распределениями. Однако некоторые из этих распределений занимают центральное место в теории погрешностей измерений. Среди них наиболее часто встречаются: биномиальный, равномерный, нормальный и логарифмический нормальный законы распределений.

Среди законов распределений, с которыми встречаемся при исследовании погрешностей измерений в геодезии, нормальное распределение занимает особое место, так как большинство погрешностей измерений подчиняются нормальному закону распределения. Уклонение от нормального закона распределения чаще всего свидетельствует о действии систематических погрешностей.

Проверка закона распределения процесса начинается с графического построения эмпирической кривой. При получении кривой выдвигается гипотеза возможного теоретического распределения. Подтверждение гипотезы можно проверить с помощью критерия согласия К.Пирсона χ^2 для сгруппированных наблюдений и критерий Р.Мизеса - Н.В.Смирнова W_2 для несгруппированных [20,21,78].

Выполним проверку распределения полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита [93]. Чтобы построить гистограмму распределения полных погрешностей (приложение А табл.А.1), расположим их в порядке возрастания, тогда крайние значения ряда равны: $X_{min} = -2''83$; $X_{max} = 2''83$.

Диапазон изменения полных погрешностей разобьем на $K = 10$ разрядов, т.е.

$$d = \frac{x_{max} - x_{min}}{K} = \frac{+2''83 - (-2''83)}{10} = 0''57. \quad (2.1)$$

Граница разрядов составит:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{min}; \\ x_2 &= x_1 + d. \end{aligned} \quad (2.2)$$

для h -го разряда

$$x_h = x_1 + h - 1 d; \quad (2.3)$$

для K-го разряда

$$x_K = x_{max} = x_{h-1} + d. \quad (2.4)$$

Для каждого интервала вычислим середину интервала

$$x_{h_{cp}} = \frac{x_{h-1} + x_h}{2}. \quad (2.5)$$

Имея вариационный ряд и границы интервалов, подсчитываем число погрешностей, попавших в каждый интервал n_h . Средин интервалов $x_{h_{cp}}$ и значения n_h приведены в графе 2 и 3 приложения А табл.А.2. На их основании построим гистограмму распределений (см.рис.2.5).

Из полученной гистограммы (рис.2.5) можем уверенно выдвинуть гипотезу о том, что полные погрешности диаметров горизонтального круга теодолита подчиняются нормальному закону распределения.

Для проверки этой гипотезы, т.е. для сравнения гипотетического и экспериментального распределения применим критерий согласия χ^2 . Гипотеза будет принята тогда, когда сумма квадратов разностей частот гипотетического и экспериментального распределений не будет превышать значения χ^2 в зависимости от уровня значимости q и числа степеней свободы $i=K-3$.

Для четырех реализаций вычислим математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение:

$$x = \frac{\sum_{j=1}^N x_i(t_j)}{n \cdot N} = 0; \quad (2.6)$$

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^N [x_i(t_j) - x]^2}{N(n-1)}. \quad (2.7)$$

Так как $x=0$, то (2.7) примет вид

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^N x_i^2(t_j)}{N(n-1)}, \quad (2.8)$$

где n -число реализаций $i = 1.4$;

N -число сечений $j = 1.60$.

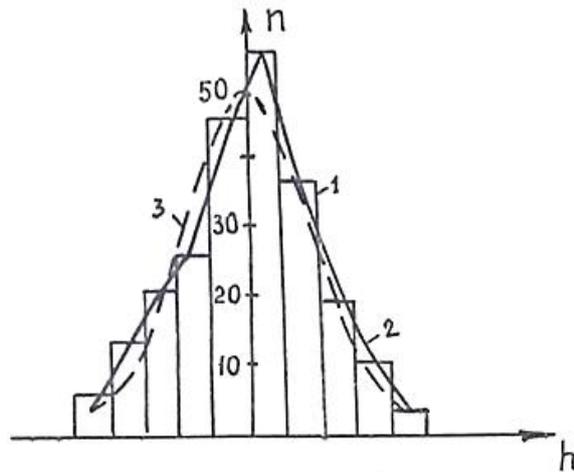


Рис.2.5: 1-гистограмма; 2-многоугольник распределения; 3-кривая нормального распределения.

Для каждого интервала вычислим число наблюдений, соответствующее теоретическому нормальному распределению

$$n_h = N \frac{c}{\delta} f z_h , \quad (2.9)$$

где N -общее число наблюдений $n \cdot N=240$;

$c = x_{h+1cp} - x_{hcp}$ - длина интервала;

$z_h = \frac{x_{hcp} - x}{\delta}$ - нормированный интервал;

при $x \leq 0$ $z_h = \frac{x_{hcp}}{\delta}$;

$f z_h = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z_h^2}{2}}$ - функция плотности вероятностей для значений z_h .

Показатель разности частот вычисляется следующим образом:

$$\chi^2 = \sum_{h=1}^K \chi_h^2; \quad \chi_h^2 = \frac{(n_h - n_h)^2}{n_h}. \quad (2.10)$$

По уровню значимости q и числу степени свободы i в таблице найдем границу критической области χ_q^2 , где

$$P \chi^2 > \chi_q^2 = q. \quad (2.11)$$

При двусторонней критической области

$$P \chi_{1-q}^2 < \chi^2 < \chi_{\frac{q}{2}}^2 = q. \quad (2.12)$$

Для $i=8-3=5$ и $q=0,05$ получим

$$0,83 < 5,16 < 12,83.$$

Гипотеза о нормальности распределения полных погрешностей принимается с уровнем значимости $q=0,05$. Результаты вычисления приведены в приложении А табл.А.3.

В результате определения полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита по способу Елисеева [39,40], мы получили табличные значения реализации случайной функции $x(t)$.

Полные погрешности диаметров горизонтального круга $x(t)$ мы не можем задать в непрерывном виде, так как исследуются штрихи (шкалы) горизонтального круга теодолита через определенные интервалы, которые являются сечениями случайной функции. Случайная функция погрешностей диаметров горизонтального круга $x(t)$ задается на конечном интервале $0-180^\circ$. Число сечений случайной функции зависит от интервала исследования, а число реализации - от числа полуприемов измерений горизонтального угла между коллиматорами.

При этом для случайной функция имеем полные погрешности

$$x_i \quad t_j \quad \text{при } i = 1..4, j = 1..60$$

Графическое изображение их приведено на рис.2.6.

Произведем корреляционный анализ полных погрешностей в следующей последовательности:

- вычисление математического ожидания по множеству реализаций;
- центрирование полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита. Центрированные значения приведены в приложении А табл.А.3, графическое изображение - на рис.2.7.

После центрирования полные погрешности будут удовлетворять условию

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N x_i(t_j)}{n \cdot N} = 0, \quad (2.13)$$

т.е. математическое ожидание центрированных значений полных погрешностей будет равно нулю по обоим осям.

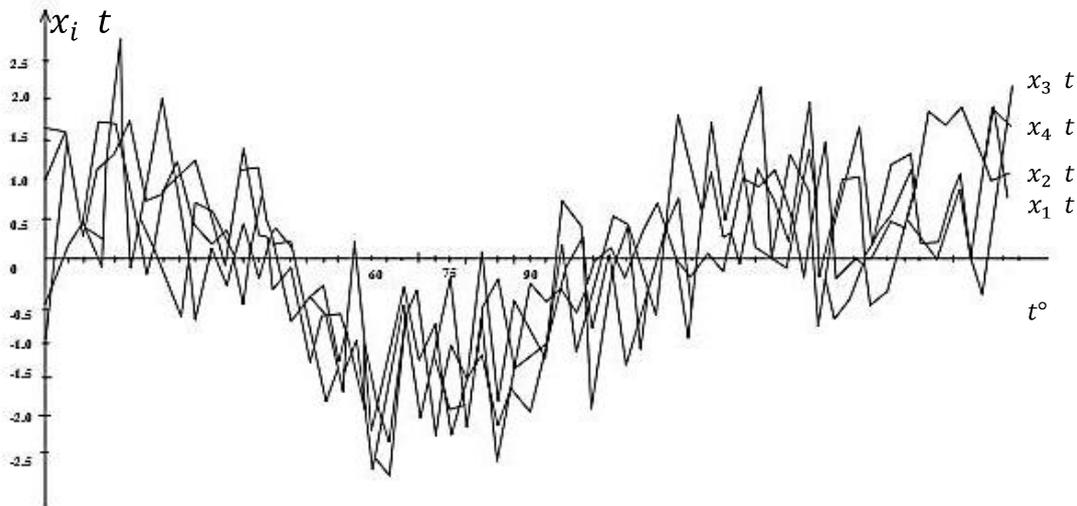


Рис.2.6. Графическое изображение полных погрешностей случайных функций



Рис.2.7. Центрирование полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита

По формуле

$$K_{x_j t_m} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [x_j t_j - \bar{x}(t_j)] [x_j t_m - \bar{x}(t_m)] \quad (2.14)$$

вычислим ковариацию центрированных полных погрешностей и получим матрицу корреляционного момента. По главной диагонали этой матрицы расположены дисперсии, которые приведены в приложении А табл.А.4, графа 2. Квадратный корень является средним квадратическим отклонением (стандартом) полных погрешностей приложение А табл.А.4, графа 3, рис.2.8).

Полученную ковариационную матрицу нормируем:

$$r_x(t_j, t_m) = \frac{K_x(t_j, t_m)}{\delta_x(t_j)\delta_x(t_m)} \quad (2.15)$$

В результате получим матрицу коэффициентов корреляции (матрица приведена в приложении - громоздкость матрицы не позволяет дать ее как она есть, поэтому она дается в построчном виде).

Усредним полученную матрицу параллельно главной диагонали, воспользовавшись формулой

$$\rho_\tau = \frac{1}{N-\tau} \sum_{j=i}^{N-\tau} r_x(t_j, t_{j+\tau}) \quad (2.16)$$

Усредненные значения коэффициентов корреляции приведены в приложении А табл.А.4, графа 4. График показан на рис.2.9.

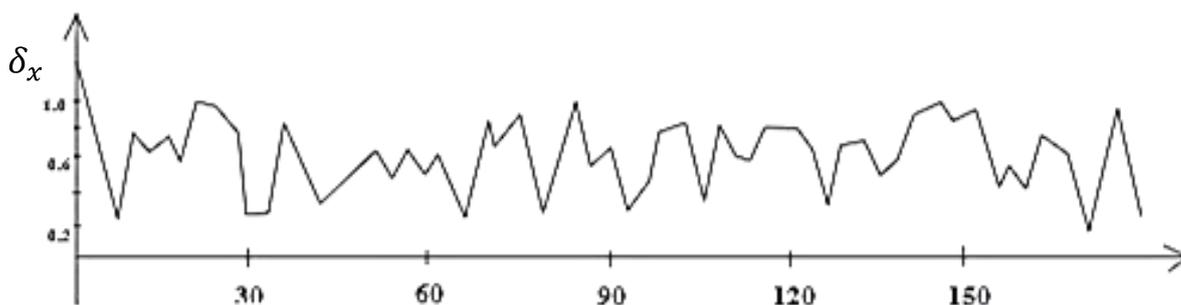


Рис.2.8. Среднее квадратическое отклонение полных погрешностей

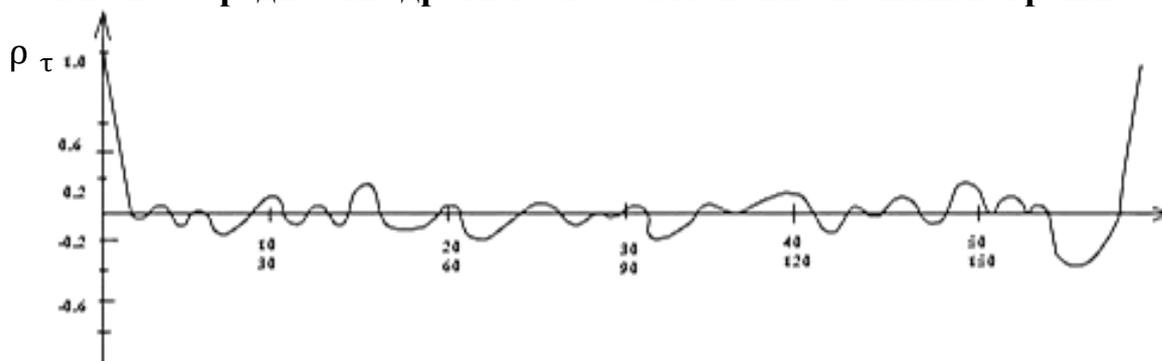


Рис.2.9. Усредненные значения коэффициентов корреляции

График усредненных корреляционных коэффициентов (рис.2.9) показывает, что частотная характеристика полных погрешностей диаметров горизонтального круга представляет собой периодическую функцию с

периодом по W , равным $\frac{2\pi}{T}$. Наибольший максимум наблюдается при значениях 0° и 180° .

Применение корреляционного анализа при исследованиях множества реализации полных погрешностей имеет селективное свойство, как схема Бюй-Балло. Учитывая (2.14), (2.15), формулу

$$\rho_{\tau} = \frac{1}{N-\tau} \sum_{j=i}^{N-\tau} r_x(t_j, t_{j+\tau}) \quad (2.17)$$

можем написать в более расширенном виде:

$$\rho_{(j-m)} = \frac{1}{N-(j \cdot m)} \sum_{j-m=1}^{N-(j \cdot m)} \frac{\sum_{i=1}^N x_i(t_j - x(t_j)) [x_i(t_m) - x(t_m)]}{\sum_{i=1}^n x_i(t_j - x(t_j))^2 \sum_{i=1}^n x_i(t_m - x(t_m))^2} \quad (2.18)$$

$j = 1, N, m = 1, N$ при $j = m, \rho_{i-m} = 1$

Эта формула более удобна для вычисления усредненных значений корреляционных-коэффициентов на ЭВМ [93].

Исследованием установлено, что полные погрешности (множество реализация) диаметров горизонтального круга теодолита при наличии периодической систематической составляющей подчиняются нормальному закону распределения; применение корреляционного анализа при исследованиях множества реализаций полных погрешностей имеет селективное (выделяющее) свойство и выделяет открытую периодическую функцию (периодическую систематическую погрешность) с периодом, равным периоду T . Установленная периодичность подтверждает, что полные погрешности диаметров горизонтального круга теодолита состоят из сумм полигармонического и случайного процессов.

Таким образом, у оптических теодолитов типа ОТ-02, Т2 и у гирокомпасов типа 15Ш29 в своё время были выявлены угломерные погрешности, зависящие от положения подставки прибора на штативе. Это послужило поводом для исследований современных угломерных приборов.

Основы методики измерений. При исследованиях тахеометром измерялся горизонтальный угол между направлениями на 2 коллиматора, угол между которыми составлял около 70° [33, 36, 43]. В качестве коллиматоров использовались зрительные трубы теодолитов 4Т30П, отфокусированные на бесконечность и установленные в горизонтальное положение. Измерения тахеометром выполнялись при одном круге (КЛ) с перестановкой подставки на штативе через 30° . 13 измерений от 0° до 360° условно считают циклом измерений. Во время измерений в цикле не допускается подправлять горизонтирование прибора. Поэтому перед измерениями по определённой технологии приводят в строго горизонтальное положение верхнюю плоскость головки штатива. В цикле не допускается перемещение зрительной трубы тахеометра по высоте. Наведения на сетки нитей коллиматоров выполнялось строго одинаково. При вращении подставки на штативе между отдельными измерениями угла обеспечивают неизменность центрировки прибора с точностью до 1-2 мм.

Выведем формулы для обработки измерений.

Пусть в одном цикле имеем 13 измерений одного и того же угла β_i , где $i = 1, 2, \dots, 13$, на разных установках горизонтального круга α_i

$$\alpha_i = 30^\circ (i - 1) \quad (2.19)$$

Из этого следует, что первое измерение угла выполняют на установке 0° , а последнее на установке 360° , т. е. опять 0° . Установка - это отсчёт по горизонтальному кругу при наведении на левое направление.

В дальнейшем нужно брать только 12 из 13 измерений, поэтому будем считать для $i=1$ среднее значение β для $i=1$ и $i=13$. При этом несколько нарушается строгость обработки. Вместе с тем нельзя обойтись без последнего 13-го измерения в цикле, так как оно является замыканием и контролем неизменности измеряемого угла.

Найдём среднее значение

$$\beta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \beta_i}{12} \quad (2.20)$$

и отклонения от среднего

$$\Delta_i = \beta_i - \beta_{cp} \quad (2.21)$$

В отклонениях Δ_i содержатся случайные и систематические погрешности. Однако целью методики исследования является выявление систематических погрешностей. Поэтому нужно уменьшить случайные погрешности. Их уменьшение достигается большим числом циклов, минимальной длительностью полуприёма и полным однообразием всех 13 измерений в цикле. Одна из основных идей диссертации – точное определение систематической погрешности прибора Δ_i . Для уменьшения влияния случайной погрешности делают 16 определений Δ для каждого i . Перед выполнением другого цикла можно всё подправить: горизонтирование верхней плоскости штатива, тахеометра, положение по высоте его зрительной трубы, фокусировку тахеометра и коллиматоров, совмещение геометрических и визирных осей зрительных труб тахеометра и коллиматоров в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При этом величина угла между коллиматорами может несколько изменяться (до $0,1^\circ \div 0,2^\circ$), что вполне допустимо.

С целью уменьшения влияния случайных погрешностей для одного тахеометра выполнялось 16 циклов. Циклы выполнялись в разное время. В результате для одного тахеометра выполнялось 208 измерений угла. Это 416 наведений на оба коллиматора.

Для каждой из 13 установок подставки на штативе имеем 16 значений Δ_i .

Используя известную формулу средней квадратической погрешности среднего

$$M = \frac{m}{n},$$

где m – средняя квадратическая погрешность одного измерения;

n – число измерений,

получим для пятисекундного тахеометра и 16 измерений

$$M = \frac{5}{16} = 1.25''$$

К приведенной оценке точности по внутренней сходимости нередко относятся с осторожностью, потому что она не учитывает систематические погрешности. Но в данном случае приведенный результат должен объективно оценивать точность методики, потому что в этой оценке точности как раз и нужны только случайные погрешности. Систематические погрешности содержатся в величинах Δ_i .

Более того, реальная погрешность M меньше приведенной величины 1,25" вследствие однообразности всех 13 измерений в цикле. Однообразие измерений в цикле обеспечивает во всех измерениях одинаковые погрешности, которые вызваны многими другими факторами, не нужными для калибровки прибора и ухудшающими результат. И если эти погрешности одинаковы, то в значения Δ_i они не попадают.

Наконец отметим, что в методике не требуется найти точный угол между коллиматорами. Нужно найти колебания измеренного угла, вызванные только тем, что измерения выполняются на разных участках лимба. Измерения углов при другом круге фактически выполняются, когда подставка прибора поворачивается на 180° , хотя труба и не переводится через зенит. А в методике нужны и эти разности измерений между кругами.

В этой связи у методики есть недостаток. Трудно обеспечить измерения угла на одних и тех же участках лимба в разных полуприёмах, но одинаковых i .

Возможно, точно делать это и не нужно. Но в результате на разброс значений Δ_i для одинаковых i оказывает влияние погрешности делений (штрихов) лимба.

Основной идеей диссертации является утверждение, что для проведения исследований точное значение измеряемого угла знать не обязательно. Между тем по рекомендации одного из специалистов результаты исследований для одного тахеометра были сравнены со значением эталонного угла, измеренного на стационарном коллиматоре точным теодолитом ТНЕО-010.

Следует отметить, что метод перестановки подставки на штативе известен, хотя и редко применяется. В книге «Курс инженерной геодезии» Николай Никитич Лебедев пишет: «Двух- или трехкратное независимое центрирование инструмента и визирных приспособлений в процессе измерения угла ослабляет влияние ошибок центрирования и редукции на результаты угловых измерений».

В методике, описываемой во втором разделе диссертации, перестановка подставки на заданный угол применяется для исследования прибора на наличие погрешностей измерения горизонтальных углов, а не с целью ослабления ошибок центрирования и редукции. Кстати логичней было бы переставлять прибор не через 120° , а через 180° , но это не делают только по одной причине: в одном из положений подставки её подъёмные винты не будут опираться на головку штатива.

Таким образом, в основе метода измерений лежит способ измерения горизонтального угла полуприёмами с перестановкой подставки на штативе между полуприёмами на заданный угол. Достоинство данного метода заключается в том, что появляется возможность провести исследование погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами практически в любой геодезической организации, которая имеет 3 штатива и 2 теодолита типа Т30.

2.2 Разложение угломерных погрешностей в ряд Фурье

Уместно выполнить сравнение предлагаемого метода обработки результатов с помощью рядов Фурье со способом, описанным в книге М. М. Карсунской «Геодезические приборы», 2002. На странице 97 рис. 2.23, 2.4 Карсунская приводит результаты исследования участка лимба в пределах от $0'$ до $3-4'$ для определения погрешностей интерполяторов системы отсчитывания направлений. Это делалось с помощью оптического микрометра теодолита Т05, труба которого использовалась в качестве

коллиматора. Измерения проводились с шагом 5 угл. сек. в пределах нескольких шагов раstra в прямом и обратном ходе при установках алидады от 0 до 330° с шагом 30°. В данной работе применяются ряды Фурье для анализа гармонических колебаний на всем участке лимба от 0 до 360° с целью выявления погрешностей измерения горизонтальных углов. В этом и состоит отличительная особенность экспериментов и моделирования погрешностей, проводимых Карсунской М.М. и в данном исследовании.

Исследования показали, что зависимость отклонений Δ от угла α можно считать периодической функцией $F(\alpha)$ в интервале 0 ... 360°. Используем для установления зависимости разложение в ряд Фурье [29].

$$F \alpha = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \cos k\alpha + B_k \sin k\alpha, \quad (2.22)$$

где A_0, A_k, B_k – коэффициенты ряда; n – число членов разложения; - целые положительные числа ($k=1, 2, \dots, n$)

В общем виде коэффициенты ряда определяют по формулам Эйлера – Фурье [50]

$$A_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F \alpha \cdot \cos k\alpha \cdot d\alpha; \quad B_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F \alpha \cdot \sin k\alpha \cdot d\alpha. \quad (2.23)$$

Применительно к 12 дискретным значениям функции $F(\alpha)$, равным Δ_i , можно вывести формулы

$$A_k = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} \Delta_i \cdot \cos k\alpha_i, \quad B_k = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} \Delta_i \cdot \sin k\alpha_i. \quad (2.24)$$

При $k = 0$ свободный член ряда равен нулю

$$A_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{12} \Delta_i \cdot \cos 0 = 0 \quad (2.25)$$

потому что сумма Δ_i отклонений от среднего всегда равна нулю. Поэтому в дальнейшем будем использовать вместо (2.22) формулу

$$F(\alpha) = \sum_{k=1}^n (A_k \cos k\alpha + B_k \sin k\alpha). \quad (2.26)$$

Формулу (2.26) можно написать иначе через амплитуды гармоник C_k и их фазы θ_k

$$F(\alpha) = \sum_{k=1}^n C_k \sin(k\alpha + \theta_k), \quad (2.27)$$

где

$$C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad \operatorname{tg} \theta_k = \frac{A_k}{B_k}. \quad (2.28)$$

Первоначально предполагалось выполнять разложение функции $F(\alpha)$ на 3 гармоники ($k=1, 2$ и 3). Однако при исследованиях выяснилось, что у одного из приборов основную погрешность даёт 4-я гармоника, поэтому разложение функции погрешности выполнялось на 4 гармоники.

Существенно, что все гармоники ряда независимы между собой. Это видно из формул (2.24): оба коэффициента любой гармоники вычисляются по формулам (2.24), в функциях косинуса и синуса которых содержится только соответствующее данной гармонике число k и не содержится чисел других гармоник $k+1, k+2, \dots$ и т. д. Это означает, что если отбросить в ряду какую-либо гармонику (приравнять её нулю), то другие гармоники не изменятся.

Известно, что в общем случае при решении уравнений с большим числом неизвестных, если одно из неизвестных приравнять к нулю, то изменятся все другие неизвестные. А члены ряда Фурье тоже можно найти путём решения уравнений с неизвестными коэффициентами ряда A_k и B_k в частности по методу наименьших квадратов (МНК).

Представляет интерес связь ряда Фурье с методом наименьших квадратов. Так для параметрического способа уравнивания можно составить уравнения поправок

$$F(\alpha) - \Delta_i = v_i. \quad (2.29)$$

Уравнивание состоит в том, что нужно найти такие значения A_1, B_1, \dots, A_n

$$F(\alpha) = f(\alpha + \varphi) - f(\alpha), \quad (2.31)$$

где φ – величина угла при измерениях.

Аналогично (2.22) напишем для $f(\alpha)$

$$f(\alpha) = \frac{a_0}{0} + \sum_{k=1}^n a_k \cos k\alpha + b_k \sin k\alpha .$$

Коэффициент a_0 здесь нужно опустить, так как постоянная неизменная погрешность в отсчёте по горизонтальному кругу не имеет смысла. Поэтому для дальнейшего анализа будем использовать формулу

$$f(\alpha) = \sum_{k=1}^n a_k \cos k\alpha + b_k \sin k\alpha . \quad (2.32)$$

Подставив в (2.17) формулы (2.8) и (2.18) будем иметь

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n a_k \cos k(\alpha + \varphi) + b_k \sin k(\alpha + \varphi) - \sum_{k=1}^n a_k \cos k\alpha + b_k \sin k\alpha = \\ & = \sum_{k=1}^n A_k \cos k\alpha + B_k \sin k\alpha , \end{aligned} \quad (2.33)$$

Преобразовав (2.33), напишем более наглядно

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n a_k [\cos k(\alpha + \varphi) - \cos k\alpha] + b_k [\sin k(\alpha + \varphi) - \sin k\alpha] = \\ & = \sum_{k=1}^n A_k \cos k\alpha + B_k \sin k\alpha , \end{aligned} \quad (2.34)$$

Учтя известные формулы для синуса и косинуса суммы углов, получим

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n a_k (\cos k\alpha \cdot \cos k\varphi - \sin k\alpha \cdot \sin k\varphi - \cos k\alpha) + b_k (\sin k\alpha \cdot \cos k\varphi + \cos k\alpha \cdot \\ & \cdot \sin k\varphi - \sin k\alpha) = \sum_{k=1}^n A_k \cos k\alpha + B_k \sin k\alpha , \end{aligned} \quad (2.35)$$

Отсюда можно написать по два уравнения для каждого k

$$a_k \cos k\alpha \cdot \cos k\varphi - a_k \cos k\alpha + b_k \cos k\alpha \cdot \sin k\varphi = A_k \cos k\alpha .$$

$$-a_k \sin k\alpha \cdot \sin k\varphi + b_k \sin k\alpha \cdot \cos k\varphi - b_k \sin k\alpha = B_k \sin k\alpha \quad (2.36)$$

которые после сокращений принимают вид

$$\begin{aligned} a_k \cos k\varphi - 1 + b_k \sin k\varphi &= A_k \\ -a_k \sin k\varphi + b_k \cos k\varphi - 1 &= B_k \end{aligned} \quad (2.37)$$

Решение уравнений (2.37) приводит к результату

$$a_k = -\frac{A_k}{2} - \frac{\sin k\varphi}{1 - \cos k\varphi} \cdot \frac{B_k}{2}, \quad b_k = \frac{\sin k\varphi}{1 - \cos k\varphi} \cdot \frac{A_k}{2} - \frac{B_k}{2}. \quad (2.38)$$

Напишем аналогично (2.27) формулу для погрешности направления через амплитуду гармоники и её фазу

$$f \alpha = \sum_{k=1}^n c_k \cdot \sin k\alpha + \vartheta_k \quad (2.39)$$

где

$$c_k = \frac{a_k^2 + b_k^2}{2}, \quad \operatorname{tg} \vartheta_k = \frac{a_k}{b_k} \quad (2.40)$$

Выведем зависимость амплитуд гармоник погрешностей направления от погрешностей измерения угла. Для этого подставим (2.24) в первую формулу

$$c_k^2 = \frac{A_k^2}{2} + \frac{\sin k\varphi}{1 - \cos k\varphi} \cdot \frac{B_k^2}{2} + \frac{\sin k\varphi}{1 - \cos k\varphi} \cdot \frac{A_k}{2} - \frac{B_k}{2} \quad (2.41)$$

Отсюда получим

$$c_k^2 = \frac{1 - \cos k\varphi^2 \cdot A_k^2 + \sin^2 k\varphi \cdot B_k^2 + \sin^2 k\varphi \cdot A_k^2 + 1 - \cos k\varphi^2 \cdot B_k^2}{4 \cdot 1 - \cos k\varphi^2} \quad (2.42)$$

После преобразований будем иметь

$$\begin{aligned} c_k^2 &= \frac{A_k^2 - 2 \cdot \cos k\varphi \cdot A_k^2 + \cos^2 k\varphi \cdot A_k^2 + \sin^2 k\varphi \cdot A_k^2}{4 \cdot 1 - \cos k\varphi^2} \\ &+ \frac{\sin^2 k\varphi \cdot B_k^2 + B_k^2 - 2 \cdot \cos k\varphi \cdot B_k^2 + \cos^2 k\varphi \cdot B_k^2}{4 \cdot 1 - \cos k\varphi^2}. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Упростив, получим

$$c_k^2 = \frac{2A_k^2 (1 - \cos k\varphi) + 2B_k^2 (1 - \cos k\varphi)}{4 \cdot 1 - \cos k\varphi^2} \quad (2.44)$$

Откуда найдём

$$c_k^2 = \frac{A_k^2 + B_k^2 \cdot (1 - \cos k\varphi)}{2 \cdot (1 - \cos k\varphi)^2} = \frac{A_k^2 + B_k^2}{2 \cdot (1 - \cos k\varphi)} = \frac{A_k^2 + B_k^2}{4 \cdot \sin^2 \frac{k\varphi}{2}}. \quad (2.45)$$

Громоздкие преобразования приводят к простому результату

$$c_k = \frac{C_k}{2 \cdot \sin \frac{k\varphi}{2}}. \quad (2.46)$$

Рассмотренную задачу преобразования погрешностей угла в погрешности направлений можно наглядно проиллюстрировать графически (рис. 2.10). Задачу можно назвать решением уравнения в конечных разностях [56]. В задаче измерены приращения искомой функции $f(\alpha)$, соответствующие приращениям переменной α , равным измеряемому углу φ . Приращения получены для дискретных значений α , изменяемых с шагом 30° . Так как оба приращения переменной α не равны между собой, необходимо задать способ интерполирования между дискретными точками. В данной задаче интерполирование выполняется вписыванием синусоид, путём нахождения 4-х гармоник ряда Фурье. Аналитически задача решается строго, так как выведенные формулы (2.38),(2.39)...(2.46) получены без каких-либо допущений.

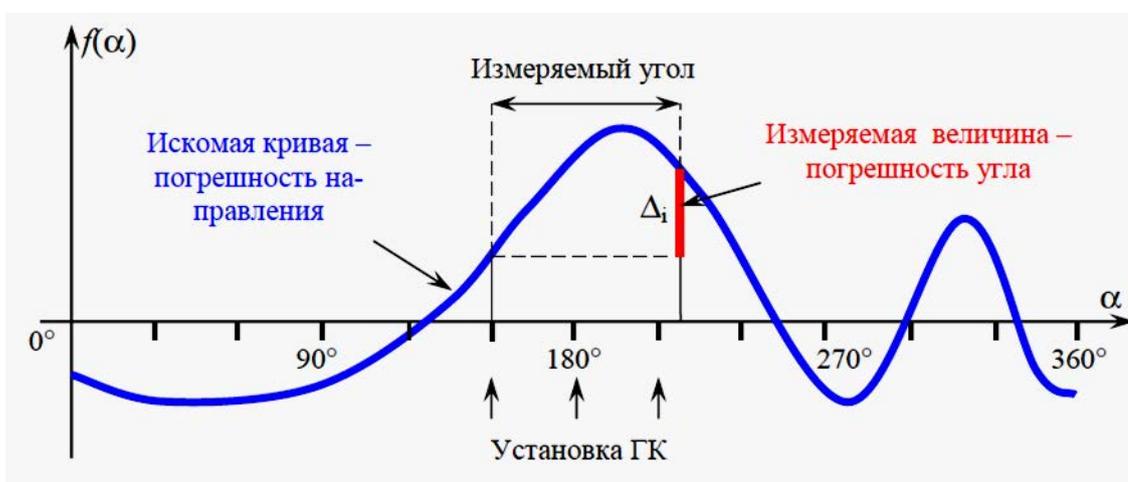


Рис. 2.10. Графическая иллюстрация задачи преобразования погрешностей угла в погрешности направлений

Заметим, что амплитуды погрешностей угла C_k можно считать измеренными величинами, а амплитуды погрешностей направления c_k – вычисленными по (2.46).

Поэтому из формулы (2.46) видно, что максимальную точность величины c_k получим, если знаменатель в (2.46) максимален по абсолютной величине. Для данной функции это условие приводит к равенству

$$\sin \frac{k\varphi}{2} = 1, \quad (2.47)$$

решение которого даёт результат

$$\frac{k\varphi}{2} = \arcsin 1 = 90^\circ, \quad \varphi = \frac{180^\circ}{k}. \quad (2.48)$$

Откуда получим выгоднейшие углы j для нахождения гармоник ряда Фурье:

- для 1-й гармоники ($k=1$): $\varphi = 180^\circ$,
- для 2-й гармоники ($k=2$): $\varphi = 90^\circ$,
- для 3-й гармоники ($k=3$): $\varphi = 60^\circ$,
- для 4-й гармоники ($k=4$): $\varphi = 45^\circ$.

Есть много и других решений. В частности максимум точности получим и при условии

$$\sin \frac{k\varphi}{2} = -1, \quad (2.49)$$

Откуда будем иметь

$$\frac{k\varphi}{2} = \arcsin(-1) = 270^\circ, \quad \varphi = \frac{540^\circ}{k}. \quad (2.50)$$

Формула даёт другие углы :

- для 1-й гармоники ($k=1$): $\varphi = 540^\circ$,
- для 2-й гармоники ($k=2$): $\varphi = 270^\circ$,
- для 3-й гармоники ($k=3$): $\varphi = 180^\circ$,
- для 4-й гармоники ($k=4$): $\varphi = 135^\circ$.

Однако при сравнении углов, вычисленных по (2.48) и (2.50), видим, что

для 1-й, 2-й и 4-й гармоник, хотя углы и разные, геометрия измерений практически одинакова. Условия не совпадают для $k=3$. Не вдаваясь в детали, заметим, что угол в 60° выгодней для исследований прибора, чем 180° , потому что в первом случае углы можно измерять стоя или сидя на одном месте, чего нельзя сделать для угла в 180° .

Использовать для определения амплитуд каждой гармоники разные углы φ нерационально. Нужно найти один наиболее выгодный угол для исследования прибора.

Для его нахождения напомним уравнение (2.39) конкретно для всех 4-х гармоник

$$f(\alpha) = c_1 \cdot \sin \alpha + \vartheta_1 + c_2 \cdot \sin 2\alpha + \vartheta_2 + \dots + c_4 \cdot \sin 4\alpha + \vartheta_4 \quad (2.51)$$

и подставим

$$c_k = \frac{C_1 \cdot \sin \alpha + \vartheta_1}{2 \sin \varphi / 2} + \frac{C_2 \cdot \sin 2\alpha + \vartheta_2}{2 \sin \varphi} + \dots + \frac{C_4 \cdot \sin 4\alpha + \vartheta_4}{2 \sin \varphi / 2}. \quad (2.52)$$

По (2.52) нужно найти такой угол φ , чтобы точность результата $f(\alpha)$ для любых α была максимальна. Задача сводится к нахождению минимума средней квадратической погрешности m_f функции $f(\alpha)$ измеренных величин C_1, C_2, \dots, C_4 , имеющих средние квадратические погрешности соответственно $m_{C_1}, m_{C_2}, \dots, m_{C_4}$. На основании известного правила преобразования полного дифференциала искомой функции в средние квадратические погрешности напишем для функции (2.52)

$$m_f^2 = \frac{\sin^2 \alpha + \vartheta_1}{\frac{4 \sin^2 \varphi}{2}} \cdot m_{C_1}^2 + \frac{\sin^2 2\alpha + \vartheta_2}{4 \sin^2 \varphi} \cdot m_{C_2}^2 + \dots + \frac{\sin^2 4\alpha + \vartheta_4}{4 \sin^2 2\varphi} m_{C_4}^2. \quad 2.53$$

Несколько усложняется задача из-за наличия в числителях (2.53) функций $\sin^2(\dots)$ от отсчёта α . Поэтому точность результата m_f зависит от α . Задачу можно решить только для средних значений этих функций. Найдём средние путём интегрирования этих функций по α в интервале от 0 до 2π и деления полученного определённого интеграла на ширину 2π этого

интервала. В общем виде для функции $\sin^2(k\alpha + \vartheta_k)$ среднее значение S_k найдём по формуле

$$S_k = \frac{\int_0^{2\pi} \sin^2(k\alpha + \vartheta_1) d\alpha}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2(k\alpha + \vartheta_k)}{4k} \Big|_0^{2\pi} = \frac{1}{2}. \quad (2.54)$$

Из этого следует, что независимо от k и ϑ_k все 4 средних в 4-х слагаемых равны $1/2$. С учётом этого, а также того, что все 4 значения C независимы между собой и имеют одинаковые средние квадратические погрешности m_c , напишем из (2.53)

$$\Phi = m_f^2 = \frac{m_c^2}{8} \operatorname{cosec}^2 \frac{\varphi}{2} + \operatorname{cosec}^2 \varphi + \operatorname{cosec}^2 \frac{3\varphi}{2} + \operatorname{cosec}^2 2\varphi. \quad (2.55)$$

График функции Φ при $m_c=1$ представлен на рисунке 2.11.

Наименьшее из многих значений φ , дающих локальные минимумы Φ , приходится на значение $\varphi = 65,4^\circ$. Минимум довольно пологий и мало изменяется в диапазоне от 60° до 70° (рис. 2.12). Поэтому такой угол можно взять для исследований прибора.

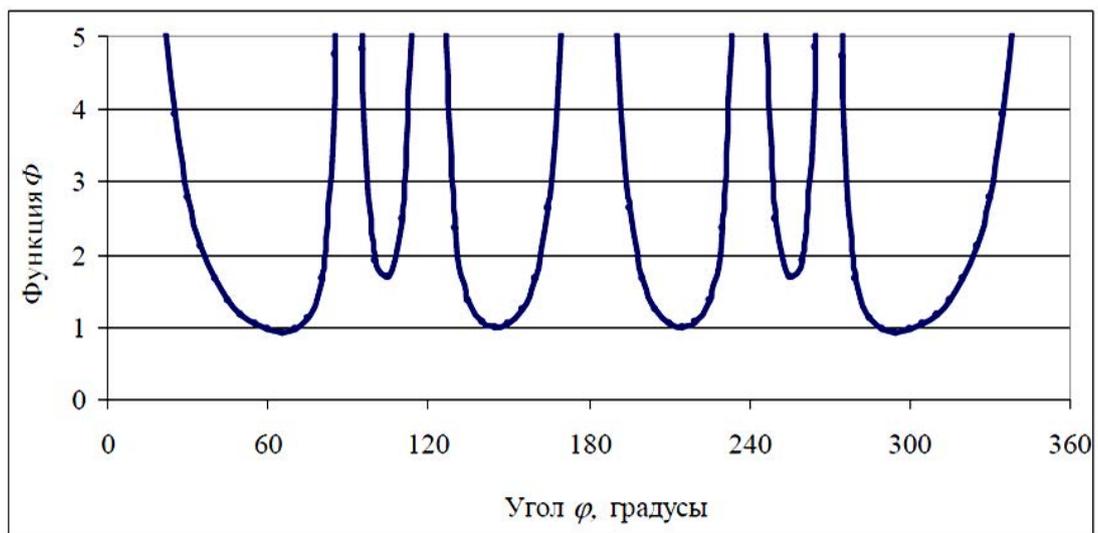


Рис. 2.11. Зависимость суммарной погрешности от угла φ

Таким образом, выведены формулы преобразования коэффициентов разных гармоник рядов Фурье от измеренных углов к направлениям по горизонтальному кругу. Выведен оптимальный угол для выполнения измерений, равный 60 - 70°.

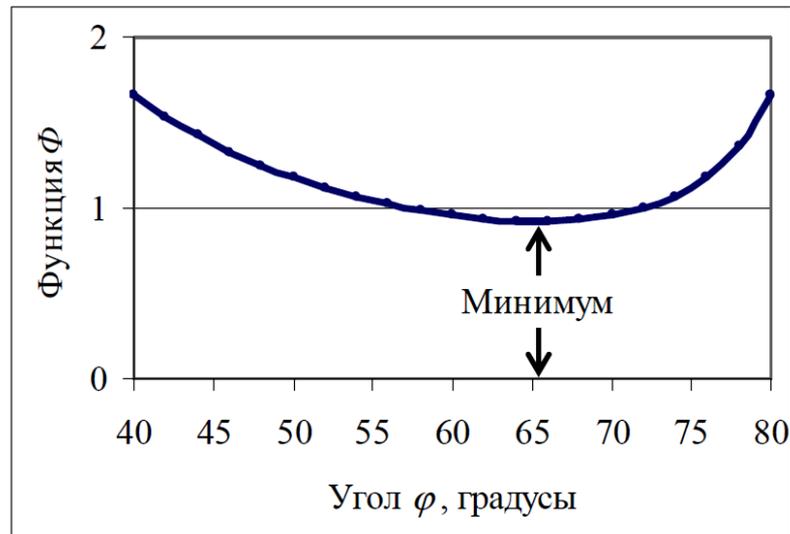


Рис. 2.12. Пологий минимум функции Φ

2.3. Оценка точности разложения в ряд Фурье

Точность нахождения коэффициентов A_k и B_k ряда можно найти, используя формулу (2.24) и правило нахождения средней квадратической погрешности функции измеренных величин

$$m_{A_k}^2 = \frac{m_{\Delta}^2}{36} \sum_{i=1}^{12} \cos^2 k\alpha_i, \quad m_{B_k}^2 = \frac{m_{\Delta}^2}{36} \sum_{i=1}^{12} \sin^2 k\alpha_i. \quad 2.56$$

где m_{A_k} , m_{B_k} – средние квадратические погрешности вычисленных A_k и B_k ; m_{Δ} - средняя квадратическая погрешность одного измерения Δ_i .

Расчёт показывает, что для любого k суммы 12 квадратов косинуса или синуса в (2.56) равны 6, поэтому напишем окончательно

$$m_{A_k}^2 = \frac{m_{\Delta}^2}{6}, \quad m_{B_k}^2 = \frac{m_{\Delta}^2}{6} \quad 2.57$$

Полученный результат совпадает с коэффициентами 0,167 обратного веса неизвестных A_k и B_k .

Результат показывает, что все 8 коэффициентов (независимые между собой как показано выше), при разложении в ряд по 4 гармоникам имеют вес, равный 6, если вес одного измерения Δ_i равен 1.

Найдём также среднюю квадратическую погрешность m_F вычисления функции $F(\alpha)$, используя формулу (2.26):

$$m_F^2 = \sum_{k=1}^4 (m_{A_k}^2 \cos^2 k\alpha + m_{B_k}^2 \sin^2 k\alpha). \quad (2.58)$$

С учётом равенств

$m_{A_k} = m_{B_k} = m_{A,B}$ и $\cos^2 k\alpha + \sin^2 k\alpha = 1$ для каждого k , получим

$$m_F^2 = 4m_{A,B}^2 \quad \text{или} \quad m_F = 2m_{A,B}. \quad (2.59)$$

Подставив в (2.59) равенства (2.57), будем иметь

$$m_F = \frac{2}{6} m_\Delta = 0.8m_\Delta. \quad (2.60)$$

Отсюда видим, что точность функции $F(\alpha)$ чуть выше точности отдельного измерения Δ_i (по весу в 1,5 раза).

Оценим также точность нахождения функции $f(\alpha)$. Из формул (2.38) найдём

$$m_{a_k}^2 = \frac{m_{A_k}^2}{4} + \frac{\sin^2 k\varphi}{1 - \cos k\varphi} \cdot \frac{m_{B_k}^2}{4},$$

$$m_{b_k}^2 = \frac{\sin^2 k\varphi}{1 - \cos k\varphi} \cdot \frac{m_{A_k}^2}{4} + \frac{m_{B_k}^2}{4}. \quad (2.61)$$

После преобразований и с учётом равенств $m_{A_k} = m_{B_k} = m_{A,B}$ получим

$$m_{a_k} = m_{b_k} = \frac{1}{2} \operatorname{cosec} \frac{k\varphi}{2} \cdot m_{A,B}. \quad (2.62)$$

С учётом (2.57) будем иметь

$$m_{a_k} = m_{b_k} = \frac{1}{2} \operatorname{cosec} \frac{k\varphi}{2} \cdot m_\Delta. \quad (2.63)$$

Формула (2.63) показывает, что точность коэффициентов для разных гармоник различная. Найдём их средние квадратические погрешности при условии

$$\begin{aligned}
m_{a_1} = m_{b_1} &= 0,378 \cdot m_{\Delta}, & m_{a_2} = m_{b_2} &= 0,224 \cdot m_{\Delta}, \\
m_{a_3} = m_{b_3} &= 0,206 \cdot m_{\Delta}, & m_{a_4} = m_{b_4} &= 0,269 \cdot m_{\Delta}.
\end{aligned}
\quad (2.64)$$

и подставим их в формулу, подобную (2.53)

$$m_f^2 = m_{a_1}^2 \cdot \cos^2 \alpha + m_{b_1}^2 \cdot \sin^2 \alpha + \dots + m_{a_4}^2 \cdot \cos^2 4\alpha + m_{b_4}^2 \cdot \sin^2 4\alpha. \quad (2.65)$$

Отсюда получим результат

$$m_f^2 = 0.308 \cdot m_{\Delta}^2, \quad (2.66)$$

показывающий, что точность функции $f(\alpha)$ выше точности одного измерения по весу в 3 раза. А сравнивая функции $F(\alpha)$ и $f(\alpha)$ видим, что вторая точнее первой по весу в 2 раза, что можно объяснить и логически.

Таким образом, анализ точности нахождения коэффициентов ряда Фурье, содержащего 4 гармоники, показывает, что точность вычисленной погрешности угла и точность вычисленного отсчёта выше точности отдельного измерения (полуприёма) по весу в 1,5 и 3 раза соответственно.

Способы исключения погрешностей разных гармоник. Если исследования прибора не проводить, но требуется выполнить измерения горизонтального угла с повышенной точностью, можно исключить погрешности дополнительными измерениями.

Так, при измерении угла при двух кругах КЛ и КП будем иметь угломерные погрешности в отсчётах, найденные по формуле (2.57), для двух значений: α и $\alpha + 180^\circ$.

$$\begin{aligned}
f \alpha &= \sum_{k=1}^n c_k \cdot \sin k\alpha + \vartheta_k, \\
f \alpha + 180^\circ &= \sum_{k=1}^n c_k \cdot \sin k\alpha + 180^\circ + \vartheta_k.
\end{aligned}
\quad (2.67)$$

В среднем значении, вычисленном по двум полуприёмам, получим погрешность

$$f_{cp} = \frac{c_k}{2} \sum_{k=1}^n \sin k\alpha + \vartheta_k + \sin(k\alpha + 180^\circ + \vartheta_k) =$$

$$= \frac{c_k}{2} \sum_{k=1}^n \sin k\alpha + \vartheta_k + \sin(k\alpha + \vartheta_k + 180^\circ k) . \quad (2.68)$$

Обозначив

$$\beta = k\alpha + \vartheta_k, \quad (2.69)$$

напишем (2.68) проще

$$f_{cp} = \frac{c_k}{2} \sum_{k=1}^n \sin \beta + 0^\circ + \sin(\beta + 180^\circ k) , \quad (2.70)$$

и после преобразования получим

$$f_{cp} = \frac{c_k}{2} \sum_{k=1}^n \sin\beta \cdot \cos 0^\circ + \cos 180^\circ k + \cos\beta \cdot (\sin 0^\circ + \sin 180^\circ k) . \quad 2.71$$

Анализ формулы (2.71) показывает, что она обращается в нуль при $k=1, 3, 5 \dots$ и т. д. при любых значениях β . Это означает, что измерения при двух кругах любого угла β исключают все нечётные гармоники.

Рассмотрим другой пример. Пусть выполнены измерения горизонтального угла тремя полуприёмами с перестановкой подставки на штативе между полуприёмами на 120° . Среднюю погрешность найдём по подобной (2.71) формуле

$$f_{cp} = \frac{c_k}{3} \sum_{k=1}^n [\sin\beta \cdot \cos 0^\circ + \cos 120^\circ k + \cos 240^\circ k + \cos\beta \cdot (\sin 0^\circ + \sin 120^\circ k + \sin 240^\circ k)] \quad (2.72)$$

Формула (2.72) обращается в нуль при всех k , кроме $k=3, 6, 9$ и т. д. Или иначе: исключаются все гармоники, кроме гармоник, кратных трём.

По аналогии с точными измерениями углов оптическими теодолитами несколькими приёмами, когда между приёмами переставляется лимб на определённый угол, подобные измерения можно выполнять и электронными тахеометрами. Однако просто изменять отсчёт между приёмами путём нажатия кнопок не имеет смысла, так как лимб при этом не поворачивается. Нужно поворачивать подставку тахеометра между приёмами.

Был также выполнен анализ влияния разных гармоник для большего числа полуприёмов. Его результаты приведены в таблице 2.1.

Нулями отмечены исключаемые гармоники. Решёткой отмечены не исключаемые гармоники.

Анализ таблицы показывает, что первые 5 гармоник исключаются, если выполнять измерение угла 3-мя приёмами с перестановкой подставки на штативе на 120° . В приёме нужно выполнять два полуприема при КЛ и КП.

Однако существенным недостатком такого способа измерений является необходимость повторного центрирования и горизонтирования прибора между приёмами. Из этого вытекает предложение изготовить дополнительное устройство для работы с прибором, которое бы обеспечивало поворот подставки на штативе на заданные углы без повторных операций по центрированию и горизонтированию.

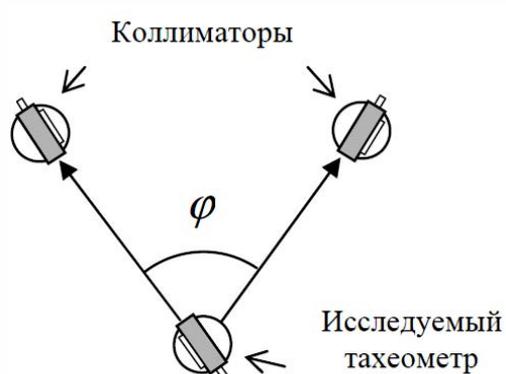
Таблица 2.1. Исключение гармоник при разном числе измерений

Число полуприёмов	Угол перестановки подставки	Номер гармоники					
		1	2	3	4	5	6
1	-	#	#	#	#	#	#
2	180°	0	#	0	#	0	#
3	120°	0	0	#	0	0	#
4	90°	0	0	0	#	0	0
5	72°	0	0	0	0	#	0
6	60°	0	0	0	0	0	#

Таким образом, доказывается, что периодические погрешности до 5-й гармоники включительно можно исключить путём измерений горизонтального угла тремя полными приёмами с поворотом подставки на штативе (столбе) между приёмами на 120° . При этом нужно каждый раз горизонтировать и центрировать прибор.

2.4. Подготовка и проведение экспериментов по выявлению погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами

Основой методики исследования погрешностей измерения горизонтального угла электронными тахеометрами является измерение горизонтального угла между двумя коллиматорами (рис.2.13) 13 полуприемами (только при круге лево) с вращением между ними подставки на штативе через 30° . 13 полуприемов условно называют циклом измерений. У современных тахеометров переставлять лимб между полуприемами, изменяя отсчеты по кругу электронным способом, не переставляя подставку на штативе не имеет смысла, потому что сам круг при этом не поворачивается, в отличие от оптических теодолитов, у которых, чтобы изменить отсчет по кругу, нужно повернуть лимб на соответствующий угол [54, 57, 89, 93].



В качестве коллиматоров использовались зрительные трубы теодолитов 4Т30П. Следует точно фокусировать их «на бесконечность», иначе появится дополнительная погрешность в угле за изменение центрировки тахеометра на штативе. Разработано несколько вариантов фокусировки на бесконечность приборов, не имеющих автоколлимационной сетки, в закрытом помещении. Подробно о каждом из них будет изложено ниже (см. п. 2.4.2).

На верхней плоскости головки штатива закрепляют пластину с отверстием под становой винт с тем, чтобы обеспечить неизменность центрировки прибора при повороте подставки на штативе с точностью 1–2мм. Пластина сделана из дюралюминия и приклеена к штативу. Также на головку штатива приклеивают кольцо, вырезанное из картона. Картон смягчает

повороты подставки на штативе и предохраняет её от преждевременного износа.

Измерения выполняют циклами. В данной работе в одном цикле измерений содержится 13 полуприемов, производимых максимально быстро и однообразно.

При измерениях в цикле нельзя подправлять горизонтирование, фокусировку и пользоваться винтом вертикальной наводки. Отсчет по горизонтальному кругу на левый коллиматор устанавливают равным

$$\alpha_i = 30^\circ \cdot i - 1, \quad (2.73)$$

где i – номер измерения в цикле.

Измеряемый угол между двумя коллиматорами равен примерно $65 - 70^\circ$.

Расстояние от тахеометра до коллиматоров не более 1 м.

При обработке результатов измерений в одном цикле измерений находят среднее значение угла

$$\beta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{13} \beta_i}{13}, \quad (2.74)$$

затем уклонения от среднего

$$\Delta_i = \beta_i - \beta_{cp} \quad (2.75)$$

по которым строят график.

В диссертации выполнены исследования 16 электронных тахеометров различных марок и производителей. Для каждого тахеометра выполнялось 16 циклов измерений в разные дни, по четыре цикла в один день.

Исследования тахеометров проводились в геомастерской ГУП «Марказий аэрогеодезия», расположенного по адресу: г. Ташкент, Юнусабадский район, ул. Халкабад, 8. Во время проведения экспериментов в помещении была постоянная температура воздуха около $15-20^\circ \text{C}$. Каждый тахеометр перед началом измерений около часа находился в помещении, чтобы прибор принял температуру окружающей среды. Пол в помещении бетонный. Внешние вибрации отсутствовали. Во время проведения измерений в помещении находились только участники эксперимента.

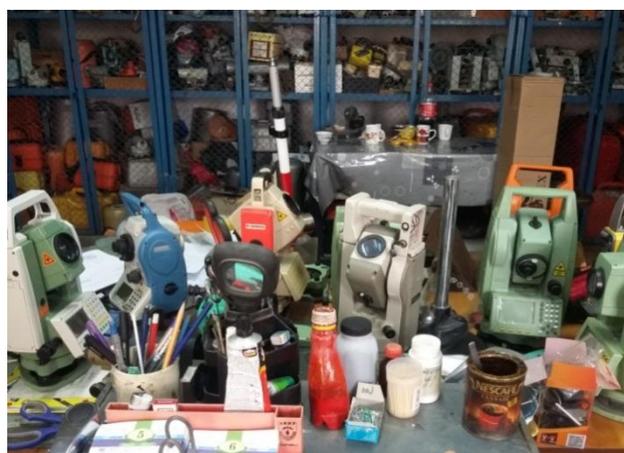


При измерениях тахеометром сила нажатия на измеряющую клавишу прибора была одинаковая и примерно с равными интервалами времени (30сек.). Чтобы избежать смещений штатива по полу помещения, были применены специальные треугольники с отверстиями для ножек штатива.

При наведении на коллиматоры, в качестве которых использовались теодолиты 4Т30П, для лучшей видимости сетки нитей был изготовлен экран из листа белой бумаги, который подсвечивался электрической лампой в 100 Вт. Также на белый лист бумаги можно было направить блик от общего освещения при помощи рядом расположенного большого зеркала. Использование данной технологии гарантировало прекрасную видимость сеток нитей коллиматоров.

Все измерения автоматически записывались в память тахеометра. Для каждого блока измерений был создан новый проект. При помощи соответствующего программного обеспечения результаты измерений передавались на компьютер и экспортировались в Microsoft Excel. Далее с помощью специальных алгоритмов данные обрабатывались и представлялись в виде специальных таблиц и графиков, где можно было наглядно оценить итоги проведенного эксперимента (см. п. 2.4.3).

В эксперименте использовано 16 электронных тахеометров с угловой точностью 1, 2, 3, 5, 6, 9". Перед началом измерений в каждом приборе устанавливалась



минимальная дискретность отсчета по горизонтальному и вертикальному углам величиной от 0,1" до 1".

С целью привязки по направлению подставки тахеометра к выполненным 13 измерениям в цикле выполнялось одинаковое для всех приборов ориентирование подставки. Для первого измерения в цикле разъем для подсоединения кабеля скачивания информации устанавливался точно под серединой экрана, когда труба тахеометра наведена на левый коллиматор. Одновременно устанавливался отсчет по горизонтальному кругу $0^{\circ}00'$.

Для того, чтобы исключить возможные люфты у прибора и штатива, перед началом каждого цикла измерений алидада тахеометра поворачивалась на 360° по часовой стрелке с несколько большим усилием и скоростью, чем при дальнейших измерениях. Это важная операция нужна Штатив исследуемого тахеометра выставлялся на такую высоту, чтобы при выполнении измерений зрительная труба тахеометра была в одной горизонтальной плоскости со зрительными трубами коллиматоров. Головка штатива должна занимать горизонтальное положение с тем, чтобы при вращении подставки на штативе не было необходимости подправлять горизонтирование прибора подъемными винтами.

Перед установкой тахеометра на штатив для приведения головки штатива в горизонтальное положение использовалась отдельная подставка с круглым уровнем, подъемные винты которой заранее по разработанной методике устанавливались в нужное положение. Подставка устанавливалась на штатив и, изменяя длину ножек штатива, пузырек круглого уровня выводился на середину. Была также разработана специальная методика горизонтирования штатива и тахеометра с помощью только цилиндрического уровня тахеометра. В результате при любых положениях подставки на штативе и закреплённом станом винте пузырек цилиндрического уровня не должен отклоняться от середины более, чем на $1 \div 2$ деления. При этом электронный уровень тахеометра принудительно отключался.

Все три прибора должны находиться на одинаковой высоте с точностью до 2–3 мм. Для дополнительного контроля правильности установки высоты инструмента на расстоянии 4 метра был установлен еще один теодолит, горизонтальной нитью которого можно было навестись на середины зрительных труб двух коллиматоров и тахеометра. Отсчет по вертикальному кругу всех угломерных приборов выставлялся на $0^{\circ} 00'$.

При проведении эксперимента были выявлены следующие особенности:

1. Если начат новый цикл измерений, не допускается производить дополнительное фокусирование резкости изображения или сетки нитей электронного тахеометра.

2. Нельзя пользоваться наводящим винтом зрительной трубы, даже если произошло небольшое смещение по высоте.

3. Наблюдатель может либо неподвижно сидеть на стуле возле прибора, производя измерения, либо стоять, что менее желательно.

4. Штатив под исследуемым прибором должен иметь возможность регулироваться по высоте, так как электронные тахеометры различных производителей имеют разную высоту от основания подставки до уровня зрительной трубы.

5. При неточной фокусировке одного из приборов появляется параллакс. Если это явление заметно, следует прекратить измерения и исправить фокусировку приборов.

6. Четкость изображения выше у прибора с более высокой кратностью увеличения. Качество оптики также значительно влияет на фокусировку.

7. Становой винт штатива следует завинчивать с одинаковым небольшим усилием для всех измерений в циклах.

8. Наведение на измеряемый объект рекомендуется делать только вдоль горизонтальной нити и так, чтобы заканчивать наведение винтом на ввинчивание. Все повороты выполнять по часовой стрелке и однообразно.

9. Перестановку подставки выполняют в следующей последовательности. После окончания очередного измерения поворачивают

алидаду на нужный отсчёт следующего измерения, отвинчивают становой винт, разворачивают против направления часовой стрелки подставку на штативе вместе с тахеометром так, чтобы зрительную трубу навести на левый коллиматор, заворачивают становой винт, аккуратно поворачивают алидаду влево на $20^{\circ} \div 30^{\circ}$, вновь наводят на левый коллиматор и делают измерения. Затем выполняют измерения на правый коллиматор, максимально аккуратно нажимая кнопку записи результатов.

Таким образом, достоинством описываемой в данном разделе методики является ее простота, возможность проведения любым пользователем в не специализированных условиях, невысокая стоимость конструктивных элементов, их доступность, надежность полученных данных.

Фокусирование приборов. В применяемой методике исследований большое значение имеет точная фокусировка «на бесконечность» зрительных труб коллиматоров и тахеометра. При фокусировке «на бесконечность» оптические пучки, несущие изображение сетки нитей, выходят из объектива параллельными между собой. Этого добиваются вращением фокусирующего винта. При этом положение диоптрийного кольца не имеет значения. Оно служит только для фокусировки изображения по глазу наблюдателя [26].



Если пучки, несущие изображение сетки, у коллиматора параллельны между собой, то при поперечном смещении тахеометра его визирная ось сохраняет параллельность относительно первоначального положения и погрешности при измерении данного угла не будет. И наоборот, если пучки у коллиматора не параллельны и пересекаются от него на расстоянии d , то поперечное перемещение тахеометра приводит к погрешности, эквивалентной погрешности за центрировку при визировании на визирную цель на расстоянии d .

Рассмотрим влияние неточной фокусировки прибора на точность работы. При вращении подставки на штативе всегда имеем место хотя бы небольшое колебание центрировки вследствие люфта станкового винта в отверстии устройства, ограничивающего перемещение тахеометра по головке штатива. Для расчёта точности фокусировки зрительных труб коллиматоров и тахеометра используем известную формулу влияния центрировки на точность измерения горизонтального угла

$$\delta\beta'' = \frac{e}{d} \cdot \rho'', \quad (2.76)$$

где $\delta\beta''$ - погрешность в угле за счёт поперечной погрешности в центрировке e ;

d - расстояние до визирной цели, $\rho'' = 206265''$.

Зададимся величинами $e = 2$ мм, $\delta\beta'' = 1''$. Подставив их в (2.76), получим $d=412$ м.

Отсюда видим, что при минимальном люфте прибора на штативе в 1-2 мм и чтобы не допустить из-за люфта погрешность в измерениях более 1'', необходимо фокусировать трубу «на бесконечность» по предмету, удалённому не менее чем на 400 м.

При фокусировании по удалённому предмету полезно карандашом сделать метку на фокусирующем винте и корпусе прибора с тем, чтобы нужное положение можно было при необходимости в помещении восстановить.

Между тем можно использовать и другие способы фокусирования «на бесконечность», потому что не всегда возможно недалеко от места работы найти подходящий удалённый объект. Кроме того, как показал опыт работы, фокусировка может несколько меняться при изменении температуры в помещении.

Поэтому, учитывая существенное влияние фокусировки на точность исследования прибора, предлагается 2 способа фокусировки в закрытом помещении.

В первом способе коллиматоры визируют друг на друга и фокусируют так, чтобы собственная сетка и видимая в трубу сетка другого коллиматора были видны одновременно резко. Это означает, что изображения обеих сеток совмещены в одной плоскости. При этом, если такое совмещение выполнено для одного коллиматора, то автоматически оно будет выполняться и для другого коллиматора. Если фокусирующего винта у одного из коллиматоров не хватает, то это означает, что фокусировка далека «от бесконечности». Следует установить у этого коллиматора фокусирующий винт недалеко от упора и отфокусировать винтом другого коллиматора. Затем навести оба коллиматора на тахеометр и отфокусировать трубу тахеометра на среднее положение фокусирующего винта при визировании на один, затем другой коллиматоры. Для этого можно карандашом на фокусирующем винте тахеометра сделать 2 метки при фокусировании на один, затем другой коллиматоры. В середине двух меток получим нужное положение для фокусировки. Затем наоборот, коллиматоры следует последовательно отфокусировать по тахеометру. Контролем правильности фокусировки всех трёх приборов является совпадение фокусировок обоих коллиматоров при повторном их наведении друг на друга. При необходимости делают второе приближение.

Второй способ применим для коллиматоров, имеющих горизонтальный круг. Вначале два коллиматора взаимно наводят друг на друга (рис. 2.14 а) и фокусируют так, чтобы видимая в трубу сетка нитей другого коллиматора и собственная сетка нитей были видны одновременно резко и точно совмещают их вертикальные нити. Совместить нужно не только визирные оси, но и их геометрические оси. Если не точно совмещены их геометрические оси, то при небольшой расфокусировке в разные стороны вертикальная нить будет перемещаться влево и вправо.

Затем поворачивают зрительные трубы обоих коллиматоров по часовой стрелке на строго одинаковый небольшой угол, пользуясь отсчетами по горизонтальному кругу. Угол поворота следует выбрать таким, чтобы около

50 % площади объектива коллиматора попадало в поле зрения другого коллиматора (рис. 2.14. б).

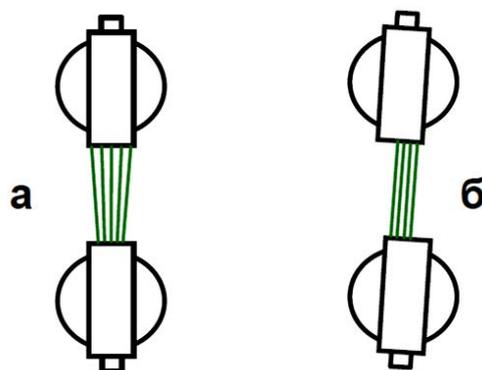


Рис. 2.14. - Фокусирование коллиматоров на бесконечность в закрытом помещении

Если первоначальные фокусировки коллиматоров не соответствовали «бесконечности», то видимые две сетки разойдутся. Их следует совместить фокусирующими винтами обоих коллиматоров. Последовательность работы винтами не имеет значения. Важен результат. Вертикальные нити сетки нужно совместить только фокусирующими винтами и добиться их одновременной резкости. В этом случае оба коллиматора будут отфокусированы «на бесконечность».



Если при первоначальной установке коллиматоров неточно были совмещены их геометрические оси, потребуется сделать второе приближение. Проверить фокусировку можно также, повернув оба коллиматора в другую сторону - против часовой стрелки.

Затем коллиматоры поворачивают на исследуемый тахеометр и его зрительную трубу фокусируют по одному из

коллиматоров. Необходимым и достаточным условием правильной фокусировки является совпадение фокусировки и для другого коллиматора.

Если в качестве коллиматора использовать автоколлимационную зрительную трубу, то процесс фокусирования прост и достаточно точен. К объективу прикладывают оптическое зеркало и фокусируют винтом отражённую от зеркала автоколлимационную сетку.

Таким образом, для проведения исследований необходима точная фокусировка на бесконечность (не ближе 400 м) зрительных труб коллиматоров и тахеометра. Кроме простого известного способа фокусировки предлагается два способа точной установки на бесконечность зрительных труб приборов при работе в закрытом помещении.

Горизонтирование штатива и тахеометра. Перед проведением измерений углов в цикле следует установить в нужное положение подъёмные винты тахеометра и ножки штатива.

Подъёмные винты нужно установить так, чтобы нижняя плоскость подставки прибора была перпендикулярна оси вращения прибора.



Изменяя длины ножек штатива, тахеометр устанавливается на нужную высоту и верхняя плоскость головки штатива приводится в горизонтальное положение.

Установка перпендикулярности подставки к оси вращения прибора выполняется в следующей последовательности. Подъёмные винты устанавливаются в среднее и одинаковое для трёх винтов положение. Для этого пользуются рисками, нанесёнными на некоторые подставки на винтах. Если их нет, то это делают с помощью линейки с миллиметровыми делениями или на глаз.

Прибор устанавливается на штатив и приблизительно горизонтируется только длинами ножек штатива. Затем становой винт слегка отвинчивается, чтобы подставку можно было поворачивать на штативе.

Разворачивают алидаду или подставку так, чтобы ось уровня при алидаде была параллельна линии, соединяющей 2 подъёмных винта, и снимают отсчёт по одному из концов пузырька уровня. Можно первоначально вместо отсчёта привести пузырёк уровня на середину ножками штатива или подъёмными винтами. Затем, удерживая одной рукой прибор за рукоятку, поворачивают другой рукой подставку на штативе на 180° . При этом алидада тоже повернётся на 180° относительно подставки. Ориентировка алидады должна сохранять первоначальное положение, для чего можно воспользоваться зрительной трубой тахеометра, наведенной приблизительно на один из коллиматоров. Снимают отсчёт по уровню, находят среднее значение и, вращая в разные стороны два подъёмных винта, устанавливают пузырёк на это среднее значение.

Затем, не изменяя ориентировку алидады, поворачивают подставку на 90° и третьим винтом устанавливают такой же средний отсчёт по уровню.

В результате этих операций плоскость подставки должна быть перпендикулярна оси вращения прибора.

Контролем правильности установки подъёмных винтов является неизменность отсчёта по уровню при любых положениях подставки, при неизменной ориентировке алидады, например на коллиматор.

Следует отметить, что если выполняется условие перпендикулярности подставки к оси вращения, то во всех 13 измерениях в цикле изображение сетки коллиматоров будет на одинаковой высоте относительно сетки исследуемого прибора. А это существенное условие, которое нужно выполнять с целью однообразности всех измерений в цикле.

Устанавливать подъёмные винты в нужное положение целесообразно непосредственно перед измерениями. Более того, подправлять горизонтирование прибора между циклами нужно, как показывает опыт, не

подъёмными винтами, а ножками штатива, потому что нарушение горизонтирования из-за нестабильности штатива гораздо существенней, чем из-за нарушения перпендикулярности оси вращения прибора к плоскости подставки.

Наконец отметим, что измерения можно выполнять и при небольшом наклоне головки штатива и уходе уровня из-за этого на несколько делений. Измеряемый угол будет несколько другой, но он будет одинаковый для всех измерений в цикле, что нужно для проведения измерений.

Проанализируем влияние негоризонтальности направлений на коллиматоры и наклона прибора при измерениях.

Известно, что если ось вращения прибора не вертикальна, то измеренное направление будет содержать погрешность

$$\delta = \gamma \cdot \operatorname{tg} \nu, \quad (2.77)$$

где γ - составляющая наклона оси прибора в угловой мере вокруг оси, параллельной визирной оси, ν - угол наклона визирной оси прибора или коллиматора.

Допустим, что оба угла могут достигать $2'$. В эту величину можно вполне уложиться, если правильно всё выполнять. Подставив этот угол в формулу (2.77) получим

$$\delta = 2' \cdot \operatorname{tg} 2' = 0.07''.$$

Отсюда видим, что неточности в горизонтировании и выставлении в горизонт коллиматоров уменьшаются более чем на 3 порядка и пренебрегаемо малы. И даже эта ничтожная погрешность не войдёт в результат, потому что она, в основном, одинакова для всех измерений в цикле.

Таким образом, разработан и испытан способ горизонтирования штатива и тахеометра перед измерениями. Он существенно облегчает установку нижней плоскости подставки тахеометра перпендикулярно его оси вращения. Погрешности за неточность горизонтирования и негоризонтальность осей

коллиматоров до 2' приводят к погрешностям в исследовании прибора менее 0,1".

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

1. Обработаны результаты ранее выполненных измерений оптическими теодолитами типа OT02, T2. Построенные графики свидетельствуют о наличии погрешностей измерения горизонтального угла, зависящих от ориентировки подставки прибора.

2. Предложен метод исследования возможности калибровки электронных тахеометров в условиях отсутствия специальной лаборатории.

3. Выведены формулы разложения на гармоники ряда Фурье погрешностей измерений горизонтального угла и преобразования их в погрешности направления.

4. Выполнено сравнение способов нахождения коэффициентов ряда Фурье традиционным способом и по методу наименьших квадратов.

5. Выполнена оценка точности функций, заданных рядом Фурье.

6. Исследована возможность исключения погрешностей разных гармоник методом измерений, рассмотренном в диссертации.

7. Описана методика эксперимента по выявлению погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами.

8. Выделен ряд рекомендаций по подготовке и проведению экспериментов, описан процесс создания определенных условий для их проведения.

ГЛАВА-III. АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Преобразование результатов измерений горизонтальных углов, полученных разными моделями электронных тахеометров в различных форматах

Как отмечается в работе [35], после выполнения измерений выполнялось копирование результатов из памяти тахеометра. Измеренные данные электронных тахеометров различных производителей хранятся и выводятся из прибора в разных форматах. Форматы отличаются количеством выводимых строк, их содержанием, порядком представления измеренных и сохраненных данных, количеством запятых или пробелов между разными типами данных.

Ниже приведем пример для тахеометра Leica 405 power. В таблице 3.2 представлен фрагмент данных с расширением ASC.

Форматным файлом является SDR33 четвертой версии, что отражено в первой строке. Во второй строке записано название проекта GURA31.07.10. В третьей строке предполагается размещение информации об операторе, выполняющем съемку. Четвертая строка содержит масштабный коэффициент. Далее приводятся сведения об атмосферных поправках, температуре и давлении. В восьмой строке записывается дата и время создания проекта. Приводятся сведения о производителе оборудования, модели прибора, его серийном номере. Следующие несколько строк посвящено выполнению ориентирования прибора, заданию высоты инструмента и визирования.

На каждую съемочную точку выделяется по 2 строки. В первой строке записан код 09F1, означающий, что записанная точка является съемочной. Затем пишется информация о станции, с которой производилась съемка, т. е. ST1, после чего отображается информация о станции ориентирования ST3. Далее следует запись, например, 0001, соответствующая номеру съемочной точки. Число 0 означает горизонтальное проложение от электронного тахеометра до измеряемого объекта. Так как записывались только углы, то расстояния во всех строчках равны нулю. Следующее записанное число

89,95131503 означает отсчёт по вертикальному кругу (ВК) на измеряемую точку, при условии, что 0° по вертикальному кругу был выставлен на зенит. Единицей измерения в данном случае являются градусы и доли градуса. Число 359,99834198 обозначает отсчёт по горизонтальному кругу (ГК) на измеряемую точку, который также измеряется в градусах и долях градуса. Ниже содержится запись 03NM, означающая тип отражателя и значение высоты визирования, которое в данном случае равно 0,000.

Скопированная с тахеометра первичная информация требует дальнейшей обработки. Среди множества программных продуктов, существующих на рынке, был выбран Microsoft Office Excel как наиболее доступный, функциональный и универсальный.

Таблица 3.2. Данные с тахеометра Leica 405power из текстового редактора в блокнот

00NMSDR33	V04	111111			
10NM GURA31.07.10.22					
13NMOperator:					
06NM1.00000000					
13CPSea level crn:N					
13CPC and R crn : N					
13CPAtmos crn : N					
13TS31-07-10 18:27					
13NMLEica TCR405power S/N: 849887					
01NMN	000000	00000031	0.000		
02TP	ST1	0.000	0.000	0.000	1.222
08KI	ST3	0	0	0	
07TP	ST1	ST3	0.00000000	0.00000000	
03NM 0.000					
09F1	ST1	0001	0	89.95131503	359.99834198
03NM 0.000					
09F1	ST1	0002	0	89.95155744	70.83080266
03NM 0.000					
09F1	ST1	0003	0	89.95269028	30.57964455

На листе Excel была разработана специальная форма, которая позволяет производить обработку полученных измерений. Так как каждый производитель предлагает свой формат обмена данных, который отличается количеством выводимых строк до первой измеряемой точки, то в Excel данные вставляются в первую колонку таким образом, чтобы в ячейке A25

оказались данные о первой съемочной точке. В таблице 3.3 представлен фрагмент обработки данных для тахеометра Leica 405power (таблица 3.2), преобразуемых в Excel.

Особенностью обработки на данном этапе служит выделение из всего массива полученных данных информации о номере точки, отсчётах по ГК и ВК. Эта процедура заключается в том, что в свободную от записи ячейку на уровне измеренной точки, например, в колонку J, в строку 25 записывается формула =СЖПРОБЕЛЫ(ПОДСТАВИТЬ(ПСТР(A25;34;3);".";",";")).

В данной формуле функция ПСТР возвращает заданное число знаков из текстовой строки, начиная с указанной позиции.

Таблица 3.3. Фрагмент обработки в Excel данных с тахеометра Leica 405power

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
11	00NMSDR33	V04		111111						Наимен	ГК, г.доли	ВК, г.доли
12	10NM	GURA	31.07.10.22									
13	13NM	Operator:										
14	06NM	1.00000000										
15	13CP	Sea level cm :N										
16	13CP	C and R cm : N										
17	13CP	Atmos cm : N										
18	13TS	31-07-10 18:27										
19	13NM	Leica TCR405power	S/N: 849887									
20	01NM	MN	000000	00000031	0.000							
21	02TP	ST1	0.000	0.000	0.000	1.222						
22	08KI	ST3	0	0	0							
23	07TP	ST1	ST3	0.00000000	0.00000000							
24	03NM	0.000										
25	09F1	ST1	0001	0	89.95131503	359.99834198				001	359,9983	89,9513
26	03NM	0.000										
27	09F1	ST1	0002	0	89.95155744	70.83080266				002	70,8308	89,9516
28	03NM	0.000										
29	09F1	ST1	0003	0	89.95269028	30.57964455				003	30,5796	89,9527
30	03NM	0.000										
31	09F1	ST1	0004	0	89.95277004	101.41254054				004	101,4125	89,9528
32	03NM	0.000										
33	09F1	ST1	0005	0	89.95281627	60.23641856				005	60,2364	89,9528
34	03NM	0.000										

Функция ПОДСТАВИТЬ используется, когда нужно заменить определенный текст в текстовой строке. Она подставляет значение аргумента "нов_текст" вместо значения аргумента "стар_текст" в текстовой строке.

Функция СЖПРОБЕЛЫ применяется для обработки текстов, полученных из других прикладных программ, если эти тексты содержат лишние пробелы. Удаляет из текста все пробелы, за исключением одиночных пробелов между словами.

В данном примере в ячейку J25 подставляется часть текста, содержащегося в ячейке A25, начиная с 34 позиции в количестве 3 символов. Лишние пробелы удаляются. Записанное число будет 001, обозначающее номер точки.

В ячейку K25 записывается формула

=ЗНАЧЕН(СЖПРОБЕЛЫ(ПОДСТАВИТЬ(ПСТР(A25;73;12);".";")))).

В данной формуле, помимо описанных выше, добавляется функция ЗНАЧЕН, которая преобразует строку текста, отображающую число в число. Эта функция предназначена для обеспечения совместимости с другими программами электронных таблиц.

В данном примере в ячейку K25 подставляется часть текста, содержащегося в ячейке A25, начиная с 73 позиции в количестве 12 символов. Лишние пробелы удаляются. Записанное число будет 359,99834198, соответствующее отсчёту по ГК на точку 001.

В ячейку L25 записывается формула

=ЗНАЧЕН(СЖПРОБЕЛЫ(ПОДСТАВИТЬ(ПСТР(A25;57;12);".";")))).

Данные всех остальных электронных тахеометров, исследованных в данной диссертационной работе, обрабатываются аналогично с вышеописанным.

Программа Excel универсальная. Она позволяет решать некоторые задачи по-новому. В ней составлены программы, автоматизирующие процесс извлечения нужной информации из массива данных, записанных в ЗУ тахеометра и др. Использовались как встроенные функции Excel, так и её модуль Visual Basic Reference. Это новые программы, на которые автором (в соавторстве) получены 8 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Таким образом, рассмотрена методика обработки результатов измерений тахеометрами горизонтальных углов в программе Excel. Были применены специальные аналитические формулы по обработке для результатов измерений каждого тахеометра, а также рассмотрены особенности преобразования измеренных данных.

3.2. Анализ результатов исследований погрешностей измерения горизонтальных углов электронных тахеометров

В данном разделе рассмотрен процесс обработки измерений и анализ полученных результатов исследований.

После преобразования скопированной с тахеометра информации выполняют обработку измерений в следующей последовательности. Вычисляют измеренные углы между коллиматорами, средние углы в циклах и отклонения от средних значений.

В таблице 3.1 приведен пример обработки измерений. В графах 1-16 приводятся 192 отклонения (в дуговых секунда. 13 средних отклонений по циклам измерений приведены в графе 19. Их нужно преобразовать так, чтобы число их было 12, а сумма равнялась 0. Отклонения с поправками приведены в графе 20. По этим данным Δ_i выполняется дальнейшая обработка.

Оценка точности значений Δ_i выполнена по внутренней сходимости. Средняя квадратическая погрешность M_Δ значения Δ_i равна

$$M_\Delta = \frac{\sqrt{[\Delta' - \Delta]^2}}{16 \cdot 15}, \quad (3.1)$$

где Δ' - отклонения, взятые из граф 1-16, Δ - среднее по 16 измерениям из графы 19.

Границы полосы погрешностей (графы 22 и 23) находят по формулам

$$\Delta_{min} = \Delta_i - t_\beta \cdot M_\Delta, \quad \Delta_{max} = \Delta_i + t_\beta \cdot M_\Delta \quad (3.2)$$

где t_β - коэффициент Стьюдента.

В данной работе принято

$$t_{\beta} = 1.8 \quad (3.3)$$

что соответствует вероятности $\beta=0,9$ и числу степеней свободы 14.

Таблица 3.1. Уклонения углов от средних по 4 циклам измерений (Nikon NPL332 (5"))

Номера полуприёмов / Номера граф / Уклонения углов, сек															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
-1,9	-4,8	-3,7	-2,6	0,3	0,3	-1,3	-0,4	0,3	2,2	-1,9	2,1	0,2	-1,0	0,0	-0,6
1,1	3,3	-0,7	2,4	3,3	3,3	1,7	4,6	5,3	2,2	2,1	3,1	3,2	4,0	3,0	3,4
-0,9	3,2	4,2	3,4	2,3	2,3	2,7	2,6	5,3	5,3	6,1	3,1	4,2	7,0	7,0	3,4
1,1	4,2	1,3	-3,6	-0,7	0,3	-0,3	0,6	-1,7	0,3	-0,9	-1,9	-0,8	-1,0	-1,0	-0,6
-1,9	1,3	-1,7	-2,6	-2,7	-2,7	-3,3	-2,4	-3,7	-3,7	-0,9	-2,9	-3,8	-6,0	-3,0	-2,6
3,1	0,3	-1,7	0,4	0,3	0,3	0,7	-0,4	-0,7	-1,7	-0,9	0,1	-0,8	-2,0	0,0	1,4
2,1	-0,8	2,2	2,4	0,3	0,3	1,8	1,6	-1,7	0,2	1,1	0,1	-1,8	1,0	-3,0	-0,6
-2,9	1,3	1,2	-1,6	-2,7	-1,7	-0,3	-0,4	-1,7	-1,7	-1,9	-0,9	-2,8	2,0	-2,0	-0,6
2,1	0,2	-0,7	3,4	1,3	1,3	1,8	-2,4	0,3	-0,7	0,1	0,1	2,2	1,0	-1,0	-2,6
1,1	-2,7	1,3	-2,6	-1,7	-0,7	-0,2	-0,4	-1,7	-0,7	1,1	0,1	-0,8	-2,0	0,0	-1,6
-0,9	-4,8	-1,8	-2,6	-0,7	-3,7	-3,3	-2,4	-1,7	-1,7	-1,9	-1,9	0,2	-3,0	-1,0	-0,6
-1,9	-0,8	0,3	3,4	0,3	0,3	-0,3	-0,4	1,3	0,2	-1,9	-0,9	1,2	0,0	1,0	1,4
-1,9	0,2	-2,7	-1,6	-1,7	-1,7	0,7	0,6	1,3	1,2	2,1	1,1	0,2	1,0	2,0	2,4

Продолжение таблицы 3.1

Отсчеты, град, доли		Среднее по 16-ти	Привед. среднее	СКО-коэф. Стьюдента	Полоса погрешностей	
Левый коллиматор	Правый коллиматор				миним.	макс.
17	18	19	20	21	22	23
0	71,4	-0,79	-0,33	0,85	-1,64	0,06
30	101,4	2,83	2,79	0,64	2,20	3,47
60	131,4	3,83	3,79	0,91	2,93	4,74
90	161,4	-0,29	-0,33	0,77	-1,06	0,48
120	191,4	-2,67	-2,71	0,69	-3,35	-1,98
150	221,4	-0,10	-0,15	0,58	-0,68	0,47
180	251,4	0,33	0,29	0,71	-0,38	1,05
210	281,4	-1,04	-1,08	0,67	-1,72	-0,37
240	311,4	0,40	0,35	0,74	-0,34	1,14
270	341,4	-0,73	-0,77	0,56	-1,29	-0,16
300	371,4	-1,98	-2,02	0,57	-2,55	-1,41
330	401,4	0,21	0,17	0,60	-0,39	0,81
360	431,4	0,21	-	0,73	-0,52	0,94
Ср.угол	71,4	0,042	0,000	сумма		

Далее находят коэффициенты ряда Фурье (табл. 3.2). 8 коэффициентов (графы 2 и 3: по формулам) ряда A_1, B_1, \dots, B_4 для погрешностей измерения горизонтальных углов находят по формулам (2.24). Амплитуды гармоник (графа 4) - по формуле (2.28).

Таблица 3.2. Разложение уклонений углов и отсчётов в ряды Фурье для тахеометра Nikon NPL332

Погрешности в горизонтальном угле, сек							Отсчёты, градусы, доли		Привед. среднее
Номер гармоники K	Коэффициенты ряда Фурье			Знач. по ряду Фурье		Разности, (10)-(6)	Левый коллимат.	Правый коллимат.	
	при \cos, A_k	при \sin, B_k	амплит. C_k	по верхн. коэффиц.	по нижн. коэффиц.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	по формулам			0,136	0,136	-0,469	0	71,40	-0,33
0	0,000			2,385	2,385	0,407	30	101,40	2,79
1	0,844	0,767	1,14	4,055	4,055	-0,263	60	131,40	3,79
2	0,370	1,525	1,57	-0,410	-0,410	0,077	90	161,40	-0,33
3	-0,792	0,521	0,95	-2,810	-2,810	0,102	120	191,40	-2,71
4	-0,287	-1,037	1,08	0,080	0,080	-0,225	150	221,40	-0,15
				0,031	0,031	0,261	180	251,40	0,29
	подбором			-0,885	-0,885	-0,198	210	281,40	-1,08
0	0,000			0,299	0,299	0,055	240	311,40	0,35
1	0,844	0,767	1,14	-0,902	-0,902	0,131	270	341,40	-0,77
2	0,370	1,525	1,57	-1,711	-1,711	-0,310	300	371,40	-2,02
3	-0,792	0,521	0,95	-0,267	-0,267	0,434	330	401,40	0,17
4	-0,287	-1,037	1,08	Сумма квадратов		0,933	360	431,40	-

Продолжение таблицы 3.2

Погрешности в отсчёте по горизонтальному кругу, сек								
Номер гармоники K	Коэффициенты ряда Фурье			Знач. по ряду Фурье			Прав. колл. минус лев. колл.	Разности, (10)-(18)
	при \cos, A_k	при \sin, B_k	амплит. C_k	по верхн. коэффиц.	по нижн. коэффиц.			
					Левый коллимат.	Правый коллимат.		
11	12	13	14	15	16	17	18	19
	по формулам			-1,461	-1,461	-1,325	0,136	-0,469
0	0,000			-0,808	-0,808	1,577	2,385	0,407
1	-0,956	0,204	0,98	-1,505	-1,505	2,550	4,055	-0,263
2	-0,441	-0,700	0,83	0,244	0,244	-0,167	-0,410	0,077
3	0,476	-0,139	0,50	2,840	2,840	0,030	-2,810	0,102
4	-0,540	0,707	0,89	0,834	0,834	0,913	0,080	-0,225
				-0,502	-0,502	-0,471	0,031	0,261
	подбором			0,920	0,920	0,035	-0,885	-0,198
0	0,000			0,049	0,049	0,348	0,299	0,055
1	-0,956	0,204	0,98	-0,441	-0,441	-1,343	-0,902	0,131
2	-0,441	-0,700	0,83	0,579	0,579	-1,131	-1,711	-0,310
3	0,476	-0,139	0,50	-0,748	-0,748	-1,015	0,267	0,434
4	-0,540	0,707	0,89	Сумма квадратов				0,933

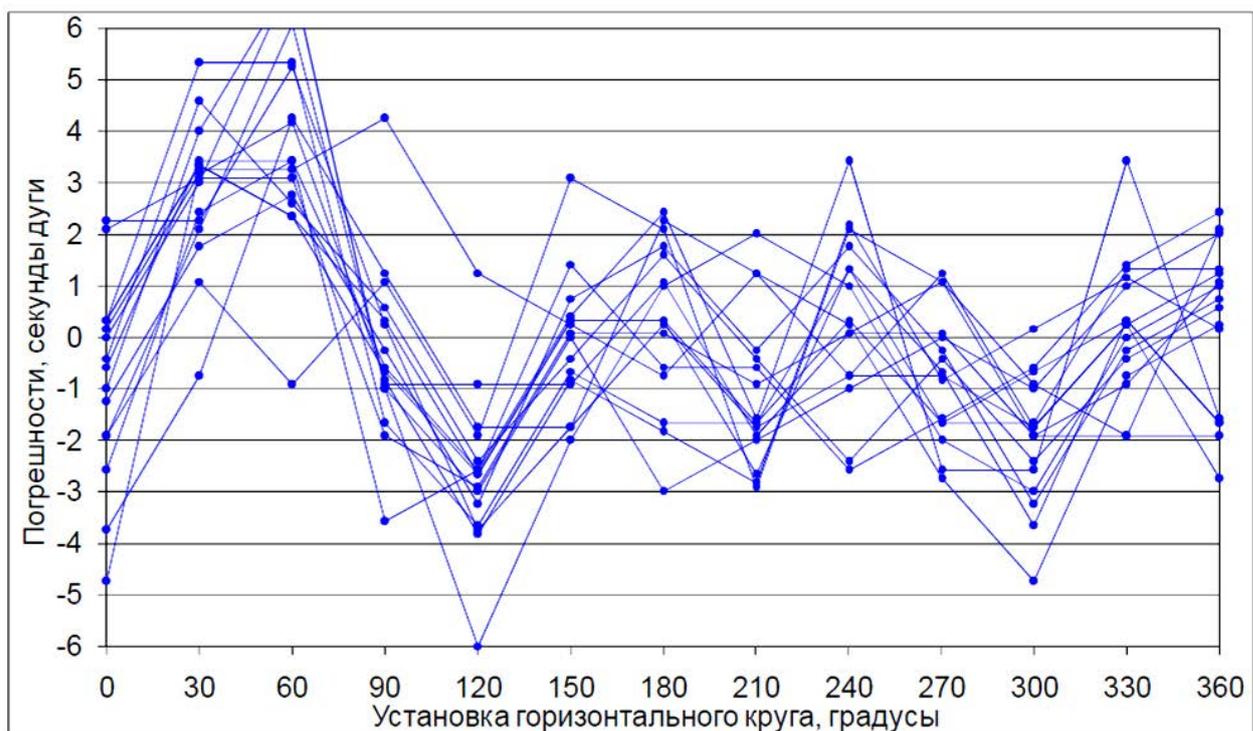
Эти коэффициенты для контроля вычисляются по методу наименьших квадратов [36] поисковым способом (таблица 3.2). Первоначально эти 8 коэффициентов (графы 2 и 3: подбором) принимают равными 0. По формулам (2.26) вычисляют функции $F(\alpha)$ по верхним коэффициентам для графы 5 и по нижним коэффициентам для графы 6. Суммируются квадраты разностей значений $F(\alpha)$ (графа 7). Сумма должна быть минимальна. Программа многократно изменяет 8 коэффициентов (графы 2 и 3: подбором) до тех пор, пока не будет получен минимум. В результате подобранные компьютером коэффициенты должны равняться верхним коэффициентам.

Одновременно анализировался результат неполного решения задачи, когда подбирается только часть коэффициентов. Например, для всех 8 коэффициентов вновь вводились нули. Затем запускалась программа поиска минимума только для двух коэффициентов A_2 и B_2 . Найденные коэффициенты имели те же значения, что и при полном решении задачи для всех 8 коэффициентов [30].

Это является подтверждением сделанных в разделе 2 выводов о независимости коэффициентов ряда Фурье и возможности их нахождения по МНК.

Далее находят коэффициенты ряда для функции $f(\alpha)$ погрешностей направлений. Коэффициенты ряда (графы 12 и 13: по формулам) a_1, b_1, \dots, b_4 находят по формулам (2.42). Ниже в этих же графах приведены подбираемые программой коэффициенты. В отличие от решения предыдущей задачи здесь функцию $f(\alpha)$ вычисляют по подбираемым коэффициентам и для левого и для правого коллиматоров (графы 16 и 17), затем находят их разности (графа 18) и разности (графа 19) с исходными уклонениями. По сумме квадратов последних разностей программа ищет минимум. Равенство коэффициентов, найденных по формулам и подобранных программой по минимуму, свидетельствует также и о правильности выведенных формул (2.24).

По результатам обработки измерений построены графики. На рисунке 3.1 показаны все 208 точек, приведенных в таблице 3.1 (графы 1-16).



**Рис. 3.1. Графики погрешностей измерения горизонтального угла
(Nikon NPL332(5''))**

Доверительный интервал (рис. 3.2) построен по данным, приведенным в графах 22 и 23 таблицы 4.1. Для этого тахеометра в доверительный интервал попадает примерно половина значений по оси α . Это свидетельствует о том, что всего для 5-6 установок из 13 в доверительный интервал попадают нули. Следовательно, погрешности прибора, если они есть, имеют величины, соизмеримые с точностью их определения.

На рисунке 3.2, кроме средних значений $\Delta_{cp,i}$ из 16 измерений для каждого i (средняя линия), показан доверительный интервал (от нижней до верхней линии) значений $\Delta_{cp,i}$ с вероятностью 0,9. Нижняя линия построена по значениям

$$\Delta_{min,i} = \Delta_{cp,i} - t_{\beta} \sqrt{\frac{[\Delta - \Delta_{cp}]^2}{n(n-1)}}, \quad (3.4)$$

верхняя линия – по значениям

$$\Delta_{max,i} = \Delta_{cp,i} + t_{\beta} \sqrt{\frac{[\Delta - \Delta_{cp}]^2}{n(n-1)}}, \quad (3.5)$$

где $t_{\beta}=1,8$ – коэффициент распределения Стьюдента для числа степеней свободы 14 и вероятности 0,9; $n=16$ – число циклов измерений.

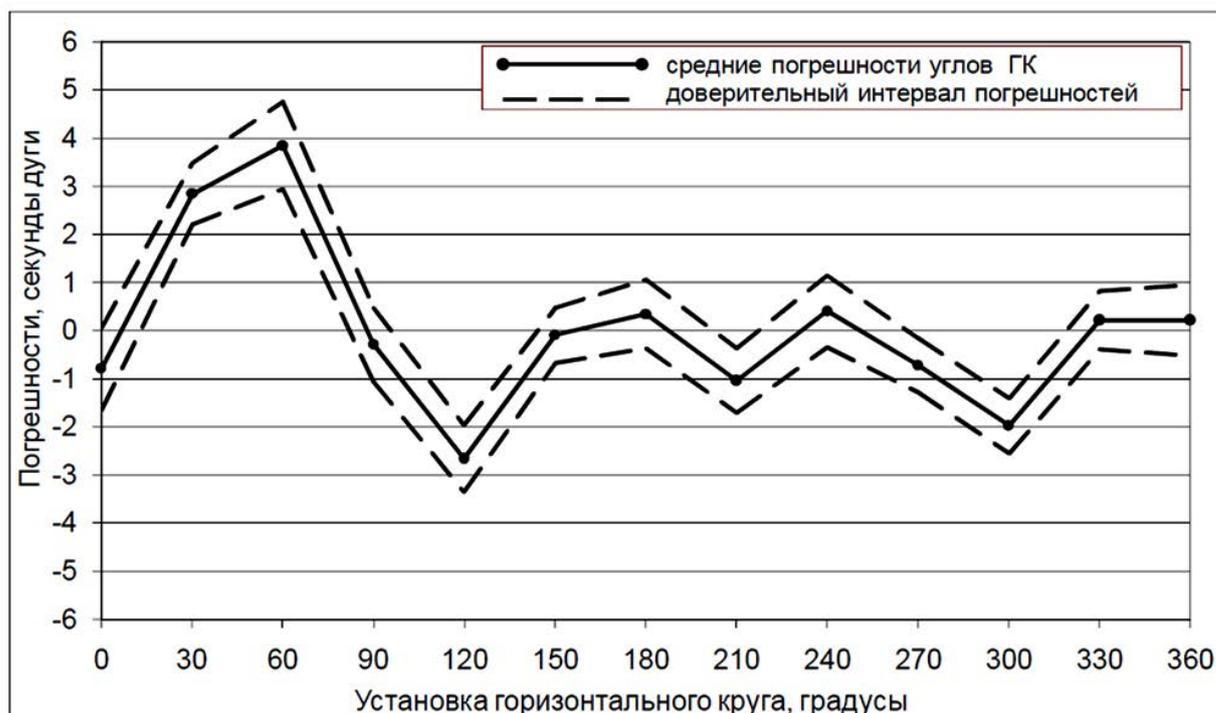


Рис. 3.2. Доверительный интервал погрешности измерения угла (Nikon NPL332(5"))

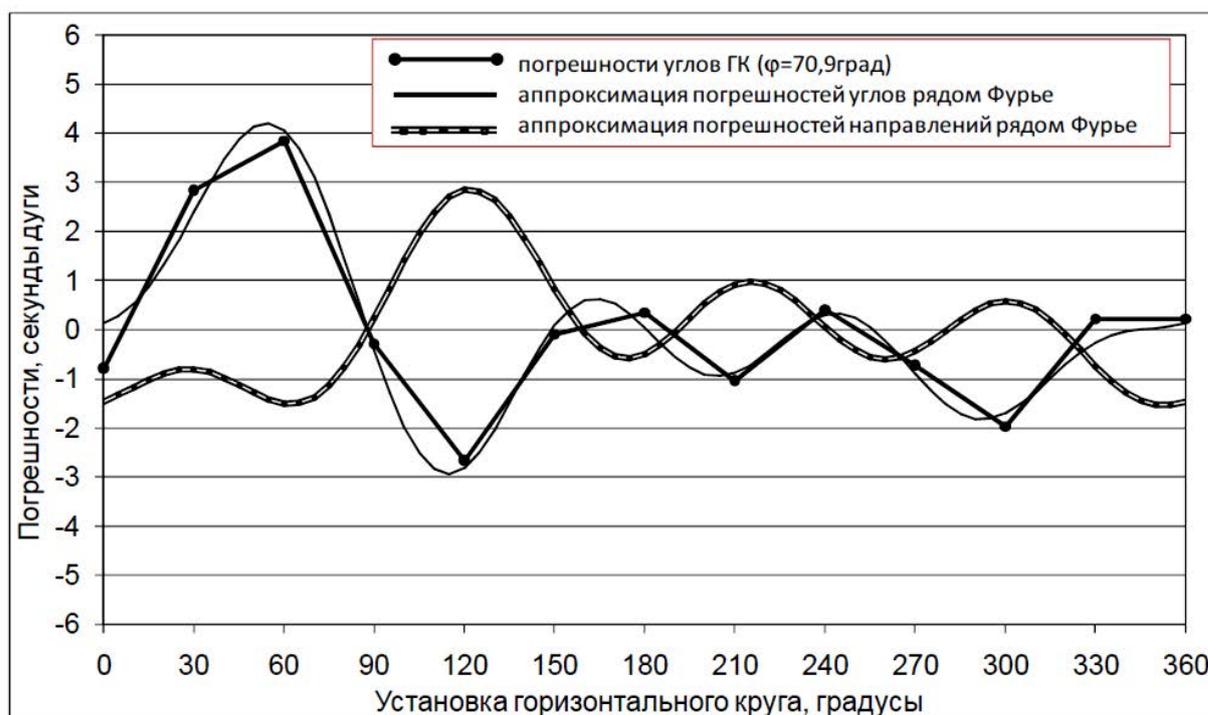


Рис. 3.3. Графики погрешностей угла и направления (Nikon NPL332(5"))

Три кривые (рис. 3.3) построены соответственно по графам 10, 5 и 15 таблицы 3.2. Ломаная линия на данном рисунке означает среднее отклонение по 16 циклам измерений. Тонкая линия показывает аппроксимацию погрешности измерения углов рядом Фурье. Двойная линия обозначает аппроксимацию погрешности направлений рядом Фурье.

В данном эксперименте были исследованы 16 приборов. Для тахеометра Nikon NPL332(5") по результатам проведенных исследований установлены отклонения горизонтального угла от средних значений в пределах от -3 до +5". На диаграмме (рис. 3.3) видно, что в интервале от 0° до 360° укладывается 4 синусоиды с разными периодами. Первая из них дает максимальную амплитуду, две последующие в два раза меньше, 4-я ещё меньше. Наибольшие амплитуды для первой, второй и четвертой гармоники равны соответственно 1,14", 1,56", 1,07" для погрешности измерения горизонтального угла и 0,97", 0,82", 0,89" для погрешности направления (табл. 3.2).

Приблизительно такие же отклонения выявлены при исследовании электронного тахеометра Spectra Precision TS515 (5") (рис. А4.2 приложения А). На его диаграмме есть 3 максимума, один довольно большой, два других в два раза меньше.

Три максимума видны и на диаграмме (рис. А5.2) прибора Trimble 3305DR (5"). Амплитуда колебаний данного прибора в пределах от -5" до +6". Вероятнее всего, что возникновение трех максимумов (3-я гармоника) происходит в результате упругих переменных деформаций в подъемных винтах подставки.

Тахеометр Nikon Nivo 5M (5") (рис. А6.2) показал 4 синусоиды с разными периодами и разной амплитудой колебаний. Определенная повторяемость результатов измерений просматривается на всех 16 циклах измерений. Наибольшая амплитуда колебаний первой гармоники составляет 3,31" для погрешности измерения угла и 2,84" для погрешности направлений.

При анализе результатов, полученных с тахеометра Leica TS06power5", в первом эксперименте (приложение А), прибор выдал незначительные амплитуды 1-й, 2-й, 3-й и 4-й гармоник равных соответственно 0,22", 0,46", 0,35", 0,22" для погрешностей измерения угла и 0,19", 0,24", 0,18", 0,17" для погрешностей направлений. На рисунке А1.1 представлен график погрешностей измерения угла тахеометра Leica TS06power5" для 16 циклов измерений. График доверительного интервала погрешностей измерения угла и средняя линия по 16 циклам измерений на рисунке А1.2 также свидетельствуют о незначительных отклонениях от среднего на всем интервале измерений. Максимальная амплитуда доверительного интервала составляет от -2" до +2", а линия средних отклонений лежит в пределах от -1" до +1" при том, что прибор заявлен со средним квадратическим отклонением горизонтального угла в пределах $\pm 5"$. На рисунке А1.3 приложения А представлена зависимость погрешностей измерений угла и направления от положения алидады. Особых отклонений диаграмма по данному прибору также не показывает. Результат исследований для данного прибора показывает отсутствие систематических погрешностей при измерении горизонтальных углов. Около половины исследованных приборов практически не имеют этих погрешностей (таблица 3.3).

Аналогично тахеометру Leica TS06power5" небольшие отклонения от среднего в пределах 2" показали приборы Leica 405power (рис. А2.1), Nikon DTM 550 (рис. А7.1), Leica TS06power2" (рис. А8.2), Leica TS06power3" (рис. А9.2), Leica TS06ultra5" (рис. А10.2), Leica Builder R100Mpower9" (рис.11.2), GeoMax ZTS605LR (рис. А12.2), Topcon GTS 225 (рис. А14.2). Остальные исследованные тахеометры показали отклонения от среднего измеренного угла до 3", 4", 5", 6" и даже 9". Такими приборами были тахеометр X (5") (рис. А3.2), Nikon NPL332(5") (рис. 4.2), Spectra Precision TS515 (5") (рис. А4.2), Trimble 3305DR (5") (рис. А5.2), Nikon Nivo 5M (5") (рис. А6.2), Sokkia Set630R (6") (рис. А13.2), Stonex ST55GP (5") (рис. А15.2).

**Таблица 3.3. Результаты исследований угломерных погрешностей
горизонтального круга тахеометров**

№ п/п	Тип тахеометра, угловая точность	Число циклов/ измерений	СКО*коэф- фициента (1,8), сек. дуги	Амплитуды погрешностей горизонтального угла для номера гармоники, секунды дуги					Амплитуды погрешностей отсчета по горизонтальному кругу для гармоники, секунды дуги				
				1	2	3	4	Сум- марная погреш- ность	1	2	3	4	Сум- марная погреш- ность
1	Leica TS06power(5")	16/208	0,65±0,94	0,22	0,46	0,35	0,22	0,65	0,19	0,24	0,18	0,17	0,40
2	Leica 405power(5")	16/208	0,42±0,76	0,45	0,58	0,10	0,16	0,76	0,39	0,31	0,05	0,13	0,52
3	Тахеометр X(5")	16/208	0,88±1,07	0,50	1,13	0,27	7,6	7,71	0,43	0,60	0,14	6,13	6,17
4	Nikon NPL332(5")	16/208	0,56±0,91	1,14	1,57	0,05	1,08	2,41	0,98	0,83	0,50	0,89	1,64
5	Spectra Precision 515(5")	16/208	0,38±0,91	0,98	1,18	1,50	1,13	2,42	0,84	0,63	0,78	0,91	1,59
6	Trimble 3305DR(5")	16/208	0,79±1,53	1,61	1,08	3,01	0,63	3,64	1,39	0,58	1,57	0,51	2,23
7	Nikon Nivo 5M(5")	16/208	0,71±1,64	3,31	1,10	1,76	0,74	3,98	2,85	0,58	0,92	0,61	3,11
8	Nikon DTM 550(1")	16/208	0,41±0,77	0,65	0,20	0,15	0,50	0,91	0,56	0,11	0,08	0,47	0,74
9	Leica TS06power(2")	16/208	0,31±0,65	0,51	0,25	0,28	0,04	0,62	0,44	0,13	0,14	0,03	0,48
10	Leica TS06power(3")	16/208	0,56±0,87	0,12	0,51	0,31	0,08	0,61	0,11	0,27	0,16	0,06	1,25
11	Leica TS06ultra(5")	16/208	0,48±0,95	0,36	0,38	0,16	0,33	0,64	0,31	0,20	0,09	0,26	0,46
12	Leica Builder R100Mpower(9")	16/208	0,35±0,83	0,07	0,33	0,09	0,30	0,46	0,06	0,18	0,05	0,24	0,31
13	GeoMax ZTS605LR(5")	16/208	0,28±0,67	0,11	1,07	0,09	0,14	1,09	0,09	0,57	0,05	0,12	0,59
14	Sokkia SET630R(6")	16/208	0,86±2,14	0,69	1,94	0,67	0,76	2,29	0,59	1,03	0,35	0,61	1,38
15	Topcon GTS 225(5")	16/208	0,41±0,81	0,31	0,74	0,05	0,28	0,85	0,26	0,39	0,03	0,23	0,53
16	Stonex ST55GP(5")	16/208	0,66±1,29	0,39	2,11	0,33	0,52	2,23	0,34	1,11	0,17	0,42	1,25

Прибор тахеометр X (5") (рис. А3.1) по результатам выполненных измерений горизонтальных углов выявил погрешность измерения угла в пределах от -10" до +8". В полном обороте алидады прибора на диаграмме (рис. А3.2) просматривается 4 явных синусоиды с периодом 90°. Максимумы

приходятся на отсчёты 45° , 135° , 225° , 315° , минимумы - на отсчёты 0° , 90° , 180° , 270° . Максимальную амплитуду имеет 4-я гармоника: для углов $7,6''$ и для направлений $6,1''$. Такие погрешности могут быть вызваны конструктивными особенностями данного электронного тахеометра или неточностями при изготовлении датчиков углов.

В ряду всех 16 тахеометров тахеометр Sokkia Set630R ($6''$) (рис. A13.2) оказался с наиболее широким диапазоном доверительного интервала. Этот факт свидетельствует о значительных случайных погрешностях измерений и малой достоверности систематических погрешностей. Колебания отклонений от среднего составляет от -4 до $+4''$. Между тем максимальная амплитуда относится ко второй гармонике. Она составляет $1,9''$ для углов и $1,0''$ для направлений.

На диаграмме колебания погрешности угла (рис. A15.2) тахеометром Stonex ST55GP ($5''$) выявлен разброс погрешности от -3 до $+4''$. Максимальная амплитуда у 2-й гармоники составляет $2,1''$ для угла и $1,1''$ для направления. На диаграмме отчетливо прослеживается наличие двух синусоид в диапазоне полного оборота в 360° .

Таким образом, наряду с тахеометрами, практически не имеющими систематических погрешностей измерений горизонтальных углов, выявлены тахеометры, систематические погрешности которых соизмеримы с заявленной точностью прибора и даже превосходящие их паспортные средние квадратические погрешности. Анализ результатов исследований показывает, что у 7 из 16 тахеометров имеют место заметные систематические погрешности в отсчётах по горизонтальному кругу, которые можно определить и ввести поправки в измерения.

3.3. Практическая значимость рассматриваемой работы.

Результаты исследований, представленные в диссертации, были внедрены в геомастерской ГУП «Markaziy aerogeodeziya» (Справка о внедрении приведен в приложении)

Были исследованы несколько электронных тахеометров, имеющихся на предприятии, и обобщены полученные результаты. Была выявлена реальная точность измерения горизонтальных углов у имеющихся приборов. Наиболее точный прибор в дальнейшем использовался для выполнения задач с повышенной точностью измерений.

Применение предложенного метода исследования электронных тахеометров актуально при строительстве уникальных объектов, мониторинге, а также при создании локальных сетей в местах, где применение GPS технологий невозможно или нерационально.

Таким образом, предложенный метод был опробован на производстве. Анализ результатов измерений показал, что для выполнения высокоточных геодезических работ можно исследовать все имеющиеся на данной фирме приборы и выбрать наиболее точный.

Любые исследования угломерных погрешностей горизонтального круга требуют точной привязки полученных погрешностей к кодовому кругу. Для приведенных в диссертации исследований привязка проводилась путём установки нулевого отсчёта по кругу при определённой ориентировке алидады относительно подставки (см. 3.1). Эту ориентировку практически невозможно выполнить точнее 1-2°. Это является трудно преодолимым препятствием для более детальных исследований.

В своё время предусматривалось в диссертации выполнить исследования погрешностей не только через 30°, но и с меньшим периодом, в том числе и короткопериодические погрешности. Вполне можно было испытать и рекомендовать более детальные исследования тахеометров, подобные исследованиям для точных оптических теодолитов, такие как исследования ошибок делений лимба, рёна оптического микрометра, правильности его работы и др. Но затруднение одно: практически все известные нам тахеометры не имеют функции установки начального отсчёта по горизонтальному кругу, привязанному к лимбу прибора. Поэтому эти исследования выполнены не были.

В связи с этим предлагается предусмотреть у электронного тахеометра возможность вывода на экран отсчёта по шкале так называемой начальной ориентировки горизонтального круга (НОГК). Фактически это означает оцифровку штрихов кодового круга и возможность знать, какие штрихи круга используются в данный момент для измерений.

Реализация функции НОГК позволяет довольно просто встроить в ЭВМ прибора универсальную программу ввода параметров проведенных исследований угломерных погрешностей и ввода поправок при измерениях. Приведенный в диссертации метод исследований может быть частным случаем этой универсальной программы. Поэтому автор диссертации не претендует на реализацию только его метода исследований.

Завод изготовитель может предложить пользователю в случае необходимости измерений с повышенной точностью провести измерения по описанной в Руководстве методике, подобно калибровке прибора для исправления коллимационной ошибки и места зенита (нуля).

При этом без труда может быть обеспечен высокий уровень автоматизации. Измерения при исследованиях автоматически записываются в запоминающее устройство, обрабатываются, выводятся параметры погрешностей в зависимости от отсчёта по шкале НОГК и вставляются в формулы ввода поправок. Затем, если это нужно, выбирается режим «повышенная точность», в котором автоматически вводятся поправки в измерения горизонтальных углов, подобно поправкам за наклон прибора, измеренный по уровню.

ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

В результате проведенных экспериментов были получены результаты исследований погрешности измерения горизонтальных углов (приложение А).

Проанализирована методика компьютерной обработки результатов измерений, полученных с различных электронных тахеометров. Приведены

формы заполнения в текстовом редакторе Блокнот с последующим преобразованием в программе Excel.

Результаты обработки исследования каждого прибора уникальны. Однако можно проанализировать их и найти общее и различное для каждого исследованного прибора.

Исследования, выполненные в работе, показывают, что погрешности носят, в основном, гармонический характер, поэтому для их анализа применены разложения в ряды Фурье.

Погрешности имеют разный период и обусловлены разными факторами. Погрешности с периодом 360° могут являться следствием эксцентриситета горизонтального круга или влиянием несовпадения центра тяжести алидады с осью вращения прибора. Под эксцентриситетом понимается несовпадение центра делений (кодовых штрихов) горизонтального круга с осью вращения прибора.

Погрешности измерений с периодом 180° могут являться следствием упругих деформаций в осевой системе прибора, вызванной внецентренностью алидады. Возможны остаточные погрешности эксцентриситета алидады горизонтального круга при двухсторонней системе отсчитывания.

Погрешности с периодом 120° могут быть следствием упругих переменных деформаций в подъёмных винтах подставки или деталях штатива.

Погрешности с периодом 90° и менее могут являться следствием конструктивных особенностей или неточностей при изготовлении датчиков углов.

Таким образом, предполагается, что погрешности измерения горизонтальных углов тахеометра носят гармонический характер с разными периодами, поэтому их можно разложить в ряд Фурье. Очевидно, что разные гармоники погрешностей вызваны разными причинами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Ташпулатову Сарвару Анваровичу, директору ГУП «Марказий аэрогеодезия» Бекбоеву Гулому Каримовичу, а также начальнику геомастерской ГУП «Марказий аэрогеодезия» и в то же время руководителю по квалификационной практике с предприятия Ибрагимову Юсуфу Мамедовичу за оказанную помощь при прохождении квалификационной практики, освоения новых навыков, предоставлении новых материалов по теме диссертации, а также создания условий для проведения экспериментов.

Основные **итоги** выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Предложен метод исследования погрешностей измерения горизонтальных углов электронных тахеометров.

2. С целью апробации предложенных методов выполнены экспериментальные исследования с использованием 16 приборов различных марок (Leica, GeoMax, Stonex, Topcon, Sokkia, Trimble, Spectra Precision, Nikon) и разной, заявленной производителем, угловой точности (1, 2, 3, 5, 6, 9").

3. Выполнен анализ полученных данных при помощи разложения в ряды Фурье, по результатам исследований составлены таблицы с результатами обработки измерений, графики погрешностей измерения горизонтальных углов и графики зависимости погрешностей измерения угла и направления от положения алидады и подставки тахеометра.

Необходимо отметить ряд преимуществ, которые может получить пользователь при использовании предложенного метода исследования электронных тахеометров:

1. Тестирование тахеометров делается на заводе изготовителя. Пользователю нет необходимости искать специальную лабораторию для тестирования.

Ему это чаще всего и не нужно. Исключением является необходимость получения свидетельства о поверке от организации, которая обычно выполняет минимум проверок прибора.

2. Ремонт тахеометров в специальных лабораториях не всегда предусматривает всестороннее исследование прибора. Во всяком случае, полной уверенности в сохранении точности работы прибора после ремонта быть не может.

3. Предлагаемые исследования можно проводить не только для введения поправок, но и с целью проверки точности работы прибора или для сравнительной оценки точности всех имеющихся в организации тахеометров. Затем в зависимости от вида выполняемых работ выбирать более или менее точный прибор. Первоначально при работе над диссертацией это и предусматривалось. Однако когда выявилась хорошая повторяемость результатов исследований, выполненных в разные дни и разными исполнителями, а также заметные погрешности приблизительно у 50% приборов, появилось обоснованное предложение вводить поправки в измерения.

Исследованные автором методы и сформулированные им общие принципы исследования электронных тахеометров в условиях производства **рекомендуется** использовать для оценки точности измерения горизонтальных углов и вычисления поправок.

Перспективы дальнейших исследований в данном направлении состоят в разработке методов, позволяющих в производственных условиях определять характеристики точности измерения электронными тахеометрами вертикальных углов и расстояний, в разработке и внедрении нормативов выполнения метрологической аттестации электронных тахеометров с уменьшением трудозатрат поверителя на выполнение поверки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон Республики Узбекистан от 25.04.1997 г. N 417-I "О геодезии и картографии"
2. Постановление Президента Республики Узбекистан от 15 июля 2008 г. № ПП-916 «О дополнительных мерах по стимулированию внедрения инновационных проектов и технологий в производство»
3. Указ Президента Республики Узбекистан от 31.05.2017 г. N УП-5065 "О мерах по усилению контроля за охраной и рациональным использованием земель, совершенствованию геодезической и картографической деятельности, упорядочению ведения государственных кадастров"
4. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 19.07.2017 г. N 529 "Об утверждении Положений о Государственном комитете Республики Узбекистан по земельным ресурсам, геодезии, картографии и государственному кадастру и о Фонде развития земельных отношений и государственного кадастра"
5. Инструкция по проведению технологической поверки геодезических приборов ГКИНП 17-195-1999.
6. Инструкция по эксплуатации электронного тахеометра GeoMax ZTS600.
7. Руководство по эксплуатации электронного тахеометра Leica Builder R100Mpower.
8. Руководство по эксплуатации электронного тахеометра Stonex ST55.
9. Руководство пользователя электронного тахеометра Topcon GPT225.
10. Руководство по эксплуатации электронного тахеометра Leica FlexLine TS02/TS06/TS09 версия 1.0.
11. Руководство пользователя электронного тахеометра Trimble 3305DR.
12. Астапович А.В. Об угловых измерениях в триангуляции // Изв.вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - № 4. - С. 21-33.
13. Баринава Е.А. Разработка и исследование методов повышения точности гониометрических систем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - СПб., 2009. - 21 с.

14. Батраков Ю.Г., Докукин П.А., Кокорев А.В. Исследования электронного тахеометра 3Та5 // Геодезия и картография. - 2002. - № 4. - С. 11-17.
15. Белозеров А.В., Солдатов В.П. О возможности раздельной фотоэлектрической регистрации линейных и угловых величин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - № 4. - С. 133-138.
16. Беспалов Ю.И., Мирошниченко С.Г. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами // Геодезия и картография. 2009. № 3. С. 12-13.
17. Бешир Ашраф А.А., Рябова Н.М., Кочетков А.В. Исследование влияния емкости батареи геодезических приборов на ошибку измерения превышения и расстояния // Сб. материалов V Междунар. науч. конгресса, Новосибирск, 20-24 апр., 2009. Т.1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч.1. - Новосибирск.: СГГА. - 2009. - С. 197-201.
18. Большаков В.Д., Зайцев А.К., Левчук Г.П., Ключин Е.Б. и др. Справочное пособие по прикладной геодезии. - М.: Недра, 1987.
19. Буюкян С.П., Безматерных М.В. Цифровой видеоколлиматор // Междунар. науч. - техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК. - М.: Издво МГУГиК. - 2004. - С. 254-256.
20. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики, М., Наука, 1965
21. Вентцель Е.С. Теория вероятностей М., Наука, 1969
22. Визиров Ю.В. Метрологическая надежность контроля геодезических приборов // Сб. докладов Семинара-совещания по проблемам метрологического топографо-геодезического и картографического производства, Москва, 29 нояб. - 1 дек., 2005. Ч.2. - М.: ЦНИИГАиК. - 2006. - С. 58-62.
23. Высокоточные угловые измерения / Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин и др. / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. - М.: Машиностроение, 1987. - 480 с.

24. Герасименко М.Д. К вопросу о выявлении грубых ошибок измерений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2010. - № 6. - С. 3-6.
25. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Высшее образование, 2008. – 404 с.
26. Голубовский О.М., Союзова Н.М. Обобщенная методика расчета распределения интенсивности лазерного излучения при прохождении через оптическую систему // Междун. науч.-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Оптическое приборостроение», Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. -С. 16-19.
27. Голыгин Н.Х., Салуниин Н.В., Шилин В.А. Оценка точности образцовой установки для измерительных систем геодезических приборов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - № 6. - С. 125-128.
28. Голыгин Н.Х., Салуниин Н.В., Шилин В.А. Преобразователь положения визирной системы на основе координатно-чувствительного приемника излучения // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - № 3. - С. 88-93.
29. Голыгин Н.Х., Травкин С.В. Стенд для аттестации вертикальных угловых измерительных систем геодезических приборов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - № 2. - С. - 128-131.
30. Голыгин Н.Х., Хиноева О.Б., Ямбаев Х.К. Возможности повышения точности геодезических измерений на основе искусственных нейросетей // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005. - № 4. - С. 17-27.
31. Голыгин Н.Х., Шилин В.А. О повышении точности угловых измерений в геодезии // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2006. - № 3. - С. 94-97.
32. Горынина Е.А., Лобаторин О.П., Петрова Г.В. Автоматизированное рабочее место поверителя теодолитов АРМ-ПТ. Исследования в области стандартизации и метрологического обеспечения приборной продукции топографо-геодезического назначения: науч.-техн. сб.

по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии. - М.: ЦНИИГАиК, 1993.

33. Гура Д.А., Аветисян Г.Г., Желтко С.Ч. Об исследованиях угломерных ошибок электронных тахеометров // Геодезия и картография. - 2011. - № 4. – С. 16-18.

34. Гура Д.А., Желтко Ч.Н., Аветисян Г.Г. Об исследованиях угломерных ошибок горизонтального круга электронных тахеометров разложением в ряды Фурье // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2011. - № 4. – С. 3-6.

35. Гура Д.А. Методика обработки результатов исследования горизонтального круга электронных тахеометров Leica TS06 power // В сборнике: Науки о Земле на современном этапе 2012. С. 109-112.

36. Гура Д.А. Разработка методики исследования погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2015. № 8. С. 89-91.

37. Гура Д.А. Разработка методики исследования угломерных ошибок электронных тахеометров // Материалы Междунар. науч. - практ. конф. Ч.2. -Киев.: Изд-во «Наири». - 2011. - 98 с.

38. Гура Д.А. Результаты исследования угломерных ошибок электронных тахеометров // Материалы V Междунар. науч. конф. Т.2. Естественные и технические науки. - Ставрополь.: СевКавГТУ. - 2011. - 162 с.

39. Елисеев С.В. Геодезические инструменты и приборы. М.,Недра, 1973.

40. Елисеев С.В. Об одном способе вычисления погрешностей диаметров кругов. –Изв.вузов.Геодезия и аэрофотосъемка, 1969, вып.5.

41. Жеболдов Г.В., Парвулюсов Ю.Б. Принципы построения стенда для контроля датчиков угла электронных теодолитов // Датчики электр. и неэлектр. величин (Датчик 93) / Тез. докл. к I Междунар. конф. Ч.2. - Барнаул. - 1993. -С. 73-79.

42. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Пастухов М.А., Шевченко Г.Г. Исследования влияния внецентренности алидады электронных тахеометров // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 6. С. 18-23.
43. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Бердзенишвили С.Г. Экспериментальные исследования погрешностей измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами // Метрология. Приложение к журналу Измерительная техника. 2014, №2. - С. 17-20.
44. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г., Пастухов М.А. История проблемы исследования погрешностей измерений углоизмерительных приборов // Изв. высш. учеб. заведений "Геодезия и аэрофотосъёмка", 2013, №5. – С. 43-45.
45. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Оптические системы зрительных труб с малым расстоянием ближнего визирования и новым способом фокусировки // Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, (Оптическое приборостроение), Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 28-35.
46. Зимин В.М. К вопросу оценки точности измерений углов на станции // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2001. - № 1. - С. 12-15.
47. Зимин В.М. Об оценке точности угловых измерений в сети триангуляции (в порядке обсуждения) // Геодезия и картография. - 2001. - № 9. - С. 18-21; № 10. - С. 15-20; № 11. - С. 20-24.
48. Зубов А.В., Зубова Т.В. Особенности точных линейно-угловых измерений электронными тахеометрами // Геопрофи. - 2005. - № 4. - С. 50-51.
49. Идрисова Ч.К., Конурбаева Г.У. Точность определения превышений электронными тахеометрами в высокогорье // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина. 2014. № 2 (31). С. 239-244.
50. Калюжина Л.Н., Калюжин В.А. Экспресс-оценка надежности и устойчивости электронных тахеометров к внешним условиям // Проблемы

метрологического обеспечения топографо-геодезического производства и землеустроительных работ: науч.-техн. конф., Новосибирск, 17-21 дек., 2001: Материалы конференции. - Новосибирск: Изд-во СГГА. - 2001. - С. 51-54.

51. Карсунская М.М. Исследование инструментальных погрешностей оптико-электронных датчиков направления угломерных геодезических приборов /Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 220-летию со дня осн. Моск. гос. ун-та геод. и картогр. (МИИГАиК) «220 лет геод. образ. в России», Москва, 24-29 мая, 1999: Тез. докл. - М. - 1999. - С. 25-26.

52. Карсунская М.М., Ямбаев Х.К. Анализ влияния инструментальных ошибок в накопительных растровых датчиках направлений с использованием компьютерной модели датчика // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2000. - № 4. - С. 115-128, 158.

53. Карсунская М.М., Ямбаев Х.К. Возможные пути уменьшения влияния инструментальных ошибок электронных геодезических приборов на точность угловых измерений. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2000. - № 4. -С. 110-115, 158.

54. Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кручинин Д.Ю. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) // Оптический журнал. - 2007. – Т.74. -№ 12. - С. 40-49.

55. Ковалев С.В. Устройство тахеометра // Геодезистъ. - 2005. - № 4-6. -С. 22-23.

56. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1970. - 720 с.

57. Корнеев С.М., Дорофеева О.Ю. Учет систематических погрешностей углоизмерительных устройств специального назначения // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1995. - № 2. - С. 121-127.

58. Личин И.Г. Особенности работы новыми безотражательными электронными тахеометрами Sokkia SETx030R3 // Междунар. науч.-техн.

конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Геодезия», Москва, 2004. - М.:Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 469-473.

59. Лонский И.И., Управление качеством измерений. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2010. - № 6. – С. 9-11.

60. Мещанский Ф.Л., Пеллинен Л.П. Исследования по угловым измерениям в триангуляции // Науч. - техн. отчет ЦНИИГАиК. - 1950. – 88 с.

61. Михеечев В.С., Попов Н.Н. Конструирование и изготовление геодезических приборов и систем // Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Оптическое приборостроение», Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУ-ГиК. - 2004. - С. 56-59.

62. Михелев Д.Ш., Ключин Е.Б., Киселев М.И. Инженерная геодезия. -М.: Академия, 2008. – 480 с.

63. Можаров Г.А., Бездидько С.Н. О некоторых проблемах, возникающих при работе с базой данных оптических систем // Междунар. науч.-техн.конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Оптическое приборостроение», Москва,2004. М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 64-67.

64. Мурзайкин И.Я., Сивакова Н.И. Метрологическое обеспечение геодезических измерений // Геодезия и картография. 2013. № 1. С. 8-10.

65. Назаров А.М., Томахин Ю.В. Опыт проектирования и изготовления портативных метрологических стендов поверки геодезических приборов. // Междунар. науч.-технич. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Геодезия», Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 227-231.

66. Парвулюсов Ю.Б., Гончар Б.В. Вопросы оценки и учета нестабильности метрологических стендов для аттестации угломерных приборов // Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Оптическое приборостроение», Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 80-83.

67. Парвулюсов Ю.Б., Гончар Б.В. Стенд для метрологической аттестации высокоточных угломерных приборов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. - № 6. – С. 157-162.

68. Пеллинен Л.П. Исследования по угловым измерениям в триангуляции // Тр. ЦНИИГАиК. - 1957. - Вып. 114. – С. 52-126.
69. Петрова Г.В., Трофимов А.С. Опыт применения автоматизированных рабочих мест для поверочных работ и перспективы их совершенствования // Сб. докладов VII отраслевого семинара по метрологии. - М.: ЦНИИГАиК, 2001.
70. Подшивалов В.П., Нестеренок М.С. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДЕЗИЯ /Учебник / Минск, 2011. – 464 с.
71. Практикум по прикладной геодезии / Под ред. Н.Н. Лебедева. - М.:«Недра», 1977. - 241 с.
72. Разумовский А. И. Прибор для измерения угловых погрешностей лимбов и растровых дисков // Оптич. журнал. - 1993. - № 6. - С. 66-70.
73. Рахымбердина М.Е. Исследование и совершенствование высокоточного инженерно-геодезического нивелирования цифровыми нивелирами и электронными тахеометрами / диссертация ... кандидата технических наук : 25.00.32 / Сибирская государственная геодезическая академия. Новосибирск, 2013. – 176 с.
74. Серебрякова Л.И., Козлова Л.Ю. Измерительные технологии в геодезии и вопросы оценки точности // Геодезия и картография. - 2002. - № 12. -С. 5 -10.
75. Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. М., Наука, 1965.
76. Сироткин М.П., Сытник В.С. Справочник по геодезии для строителей. - М.: Недра, 1987. - 376 с.
77. Скрипников В.А., Скрипникова М.А. Создание высокоточных малых линейно-угловых сетей с применением электронных тахеометров // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 1. № 1. С. 84-87.
78. Смирнов Н.В., Белугин Н.В. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении геодезии. М. Недра, 1969

79. Солдатов В.П. О повышении точности двухкоординатных оптико-электронных угломеров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2002. - № 3. - С. 121-127.
80. Солдатов В.П., Фотиев Ю.А. О погрешности из-за нестабильности параметров анализаторов изображения оптико-электронных измерений перемещений // Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Оптическое приборостроение», Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 95-99.
81. Соловьев С.В. Анализ нормативных документов по метрологическому обеспечению геодезических работ в строительстве. - М.: ГИС – Ассоциация, 2002. - С. 93-97.
82. Соловьев С.В. Метрологическое обеспечение геодезических измерений в строительстве // сб. докладов VII отраслевого семинара по метрологии.- М.: ЦНИИГАиК, 2001. - С. 103-107.
83. Соловьев С.В., Ефремов А.Д. Комбинированный способ контроля средней квадратической погрешности электронных тахеометров // Геодезия и картография. – 2002. - № 9. - С. 83-87.
84. Соловьев С.В. Проект передвижной поверочной лаборатории для метрологического обеспечения геодезических работ в строительстве // Геопрофи. – 2003. - № 5. - С. 43-47.
85. Соломатин В.А., Куликова Н.В., Куртов А.В. Использование модифицированного Фурье-анализа при исследованиях оптико-электронных систем // Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, «Оптическое приборостроение», Москва, 2004. - М.: Изд-во МГУГиК. - 2004. - С. 104-107.
86. Соломатин В.А. Оптические и оптико-электронные приборы в геодезии, строительстве и архитектуре / Учебное пособие / Москва, 2013. – 288с.

87. Спиридонов Ф.Ц., Ефремов Ф.Ц., Денисов Ф.Ц. Исследования электронного тахеометра TCR802 // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2010. № 6 (66). С. 84-88.
88. Спиридонов А.И. Основы геодезической метрологии. - М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 2003. – 248 с.
89. Справочник геодезиста / Под редакцией Большакова В.А. – М.: Недра, 1975. - 308 с.
90. Справочник по инженерной геодезии / Под ред. Н.Г. Видуева– Киев: «Вища школа», 1978. - 422 с.
91. Ташпулатов С.А. Применение теории случайных функций при исследовании полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита // Диссертация на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Киев-1979.
92. Ташпулатов С.А., Шавкатова Н.Ж. Корреляционный анализ полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита. //Архитектура.Строительство.Дизайн. Научно-практический журнал. Спец.вып. Изд.ТАСИ, Ташкент, 2017г – 106 с.
93. Ташпулатов С.А., Шавкатова Н.Ж. Поверка распределения полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита // Архитектура ва курилиш муаммолари XVII-магистрантларнинг анъанавий анжумани илмий маколалари туплами, Тошкент, 2017 – 132с.
94. Ташпулатов С.А., Шавкатова Н.Ж. Анализ основных факторов, влияющих на точность измерения углов электронными оптическими теодолитами.// «Таълим, фан ва ишлаб чиқариш интеграциясида интеллектуал салоҳиятли ёшлар-мамлакат тараққиётининг муҳим омили» мавзусидаги XIV Республикаилмий-амалий конференция материаллари. П-қисм. Самарқанд, 2017 – 4с.
95. Травкин С.В. Разработка методов и средств поверки и калибровки геодезических приборов для измерения превышений: Автореф. дис. ... на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Моск. Гос. Ун-т геод. и картогр. - М., 2007. –24 с.

96. Федотов Г.А. Инженерная геодезия: учебник. - 4-е изд., стер. - М.:Высш. шк., 2007. - 463 с.
97. Хиноева О.Б. О повышении точности измерений в геодезии // Техника и технология. - 2004. - № 6. - С. 66-69.
98. Шишкин С.Б., Шишкин Б.В. Систематическая погрешность углоизмерительного оборудования // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2013. Т. 1. № 1 (13). С. 60-63.
99. Ямбаев Х.К. Геодезическое инструментоведение. – М.: Академический проект; Гаудеамус, 2011. – 592 с.
100. Ackermann F. Grundlagen, Verfahren zur Erkennung grober Datenfehler// Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart. Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (IV). - Schriftenreihe. - 1981. - Heft 7. - P. 7-23 (Нем. Основы, методы обнаружения грубых ошибок данных).
101. Bagdziunaite Renata. Geodeziniu prietaisu konstrukciju lemiamos statybos objektu matavimo paklaidos // Geod. Ir kartogr. (Lietuva). - 2002. - № 2. - P. 58-64 (Лит. Ошибки, обусловленные конструкцией геодезических приборов при измерении на строительных объектах).
102. Bagdziunaite Renata. Horizontaliojo necentriskumo itaka atliekant geodezinius matavimus statybose // Geod. Ir kartogr. (Lietuva). - 2002. - № 4. - P. 145-150, 158, 160 (Лит. Влияние горизонтального эксцентриситета на геодезические измерения в строительстве).
103. Bernd Mitt. Leistungskriterien zur Qualitätskontrolle von Robottachymetern. Krickel // Geod. Inst. Rein. Friedrich – Wilhelms - Univ., Bonn. - 2004. - № 92. - PP. 110-111, 114-117 (Нем. Разработка критериев для проведения контроля качества автоматизированных тахеометров).
104. Buśko Malgorzata. Charakterystyka wybranych cech funkcjonalnych tachimetrów elektronicznych. Geodezia. - 2006. - № 1. - P. 43-54 (Пол. характеристика некоторых функциональных свойств электронных тахеометров).

105. Bručas Domantas, Giniotis Vytautas, Petroskevicius Petras. Basic construction of the flat angle calibration test bench for geodetic instruments // Geod. Ir kartogr. (Lietuva). - 2006. - № 3. - P. 66-70 (Лит. Основная конструкция испытательного стенда для поверки горизонтального угла геодезических приборов).
106. Bručas Domantas, Skeivalas Jonas, Giniotis Vytautas. The correlation analysis of the angle measurements // Geod. Ir kartogr. (Lietuva). - 2007. - № 4. -P. 111-114 (Лит. Корреляционный анализ угловых измерений).
107. Dzierzega Alojzy, Scherrer Rene. New compact accuracy verification method: testing total stations // GIM Int. - 2002. - № 6. - P. 31-33 (Англ. Новый компактный метод проверки точности: тестирование тотальных станций).
108. Geckeler R.D. Calibration of angle encoders using transfer function // Measurement Science and Technology. - 2006. - № 17. - P. 2811-2818 (Нем. Калибровка датчиков угла использованием передаточной функции).
109. Giniotis Vytautas, Bručas Domantas. Research of the angular positioning accuracy of the experimental test bench. // Geod. Ir kartogr (Lietuva). - 2006. - №2. - P. 37-41 (Лит. Исследование точности стенда по калибровке угломерных устройств).
110. Neitzel Frank. Bestimmung von Ziel und Kippachsenfehler polarer Meßsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen. Zfu: Z. Geod., Geoinf. Und Landmanag. - 2006. - № 3. - P. 132-140 (Нем. Определение ошибок за наклоны оси вращения зрительной трубы (горизонтальной оси) полярных измерительных систем из минимальной и избыточной конфигураций).
111. Optischer Sensor zur Bestimmung des Drehwinkels einer Drehachse: Пат., МКИ G 01 B 11/26. Braunecker Bernhard, Rogers John Rice, Gachter Bernhard; Leica AG, Heebrugg, CH. № 196 21 188.3; Заявл. 25.05.96; Опубл. 27.11.97 (Нем. Оптический датчик для определения угла поворота оси вращения).

112. Schaeuete Wolfgang. Einsatzmöglichkeiten von Lasertrackern zur Überprüfung von Winkelabgriffsystemen // Mitt. Geod. Inst. Rein. FriedrichWilhelms-Univ., Bonn. - 2002. - № 89. - P. 111-119 (Нем. Применение лазерных трекеров для Überprüfung из Winkelabgriffsystemen).

113. Yambayev Har'es, Karsounskaia Maria. Untersuchungen zur Überprüfung des Winkelabgriffsystems elektronischer Tachymeter under Berücksichtigung des Funktionsprinzips und dessen Darstellung durch Algorithmen // Z. Vermessungsw. - 2001. - № 3. - P. 150-155 (Нем. Исследования системы измерения углов электронного тахеометра в аспекте принципов ее функционирования и представления алгоритма).

Приложение А

Исследование погрешностей измерения горизонтальных углов (ГУ) и направлений (ГН) электронных тахеометров

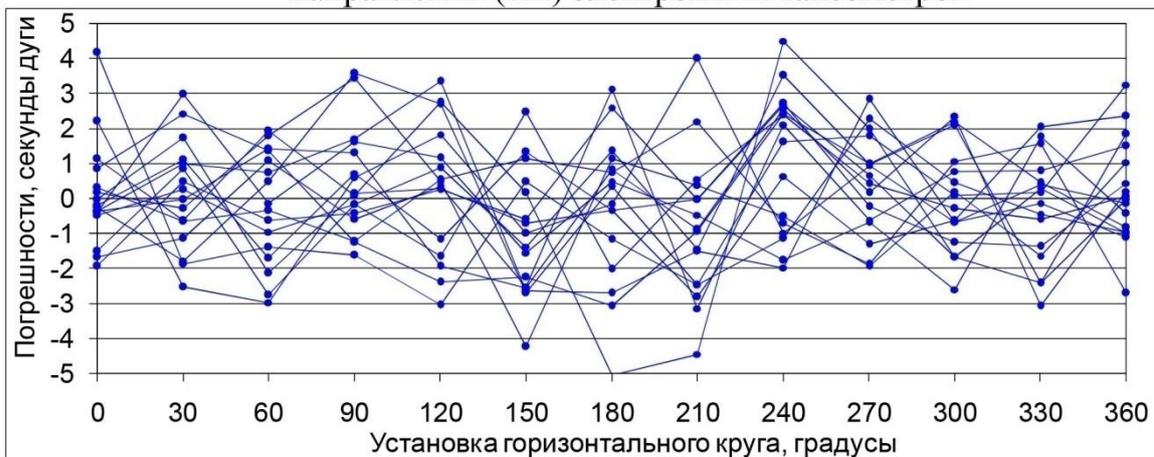


Рис. А1.1 – Уклонения ГУ (Leica TS06power(5"))

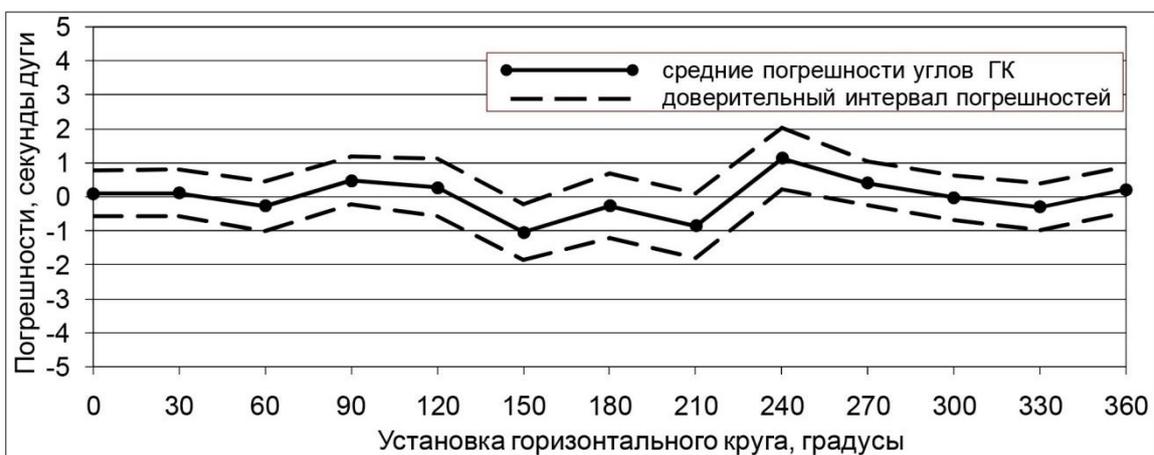


Рис. А1.2 – Погрешности ГУ (Leica TS06power(5"))

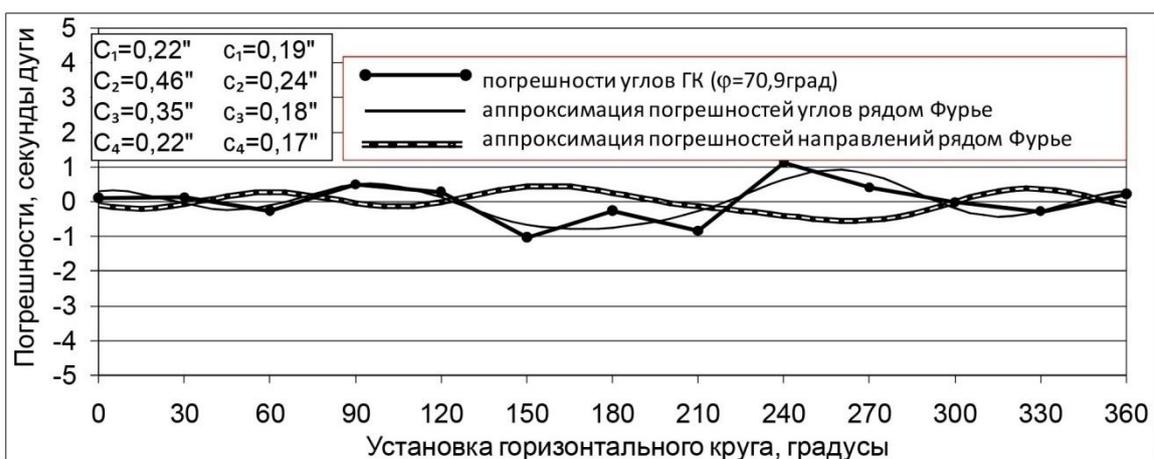


Рис. А1.3 – Погрешности ГУ и ГН (Leica TS06power (5"))

Продолжение приложения А

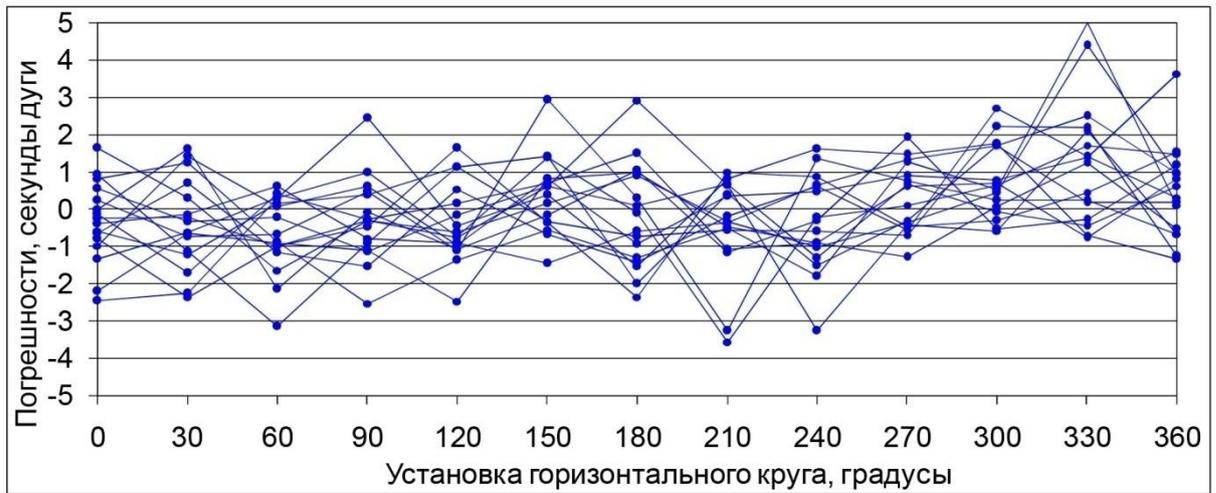


Рис. А2.1 – Уклонения ГУ (Leica 405power(5''))

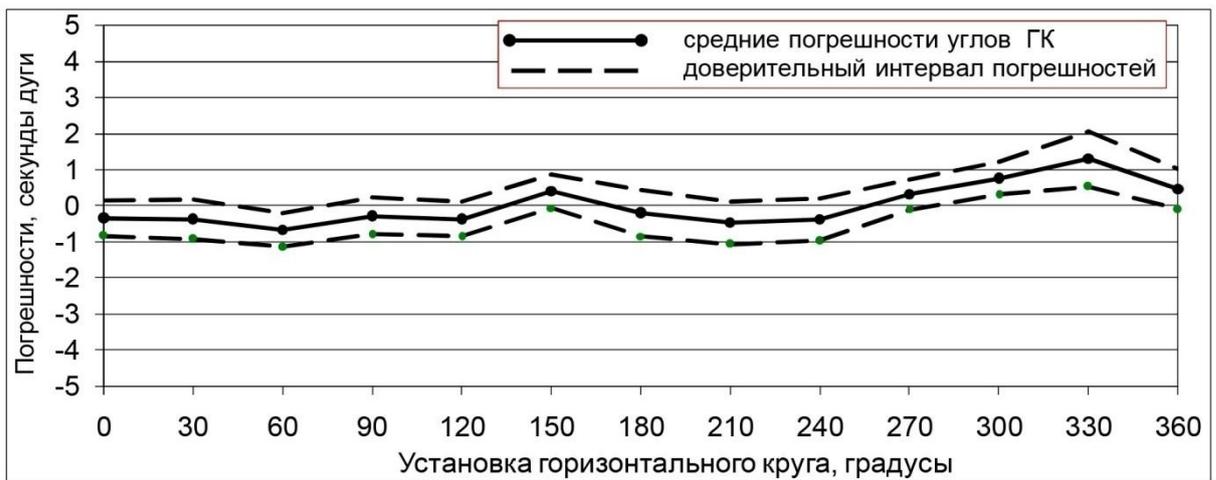


Рис. А2.2 – Погрешности ГУ (Leica 405power(5''))

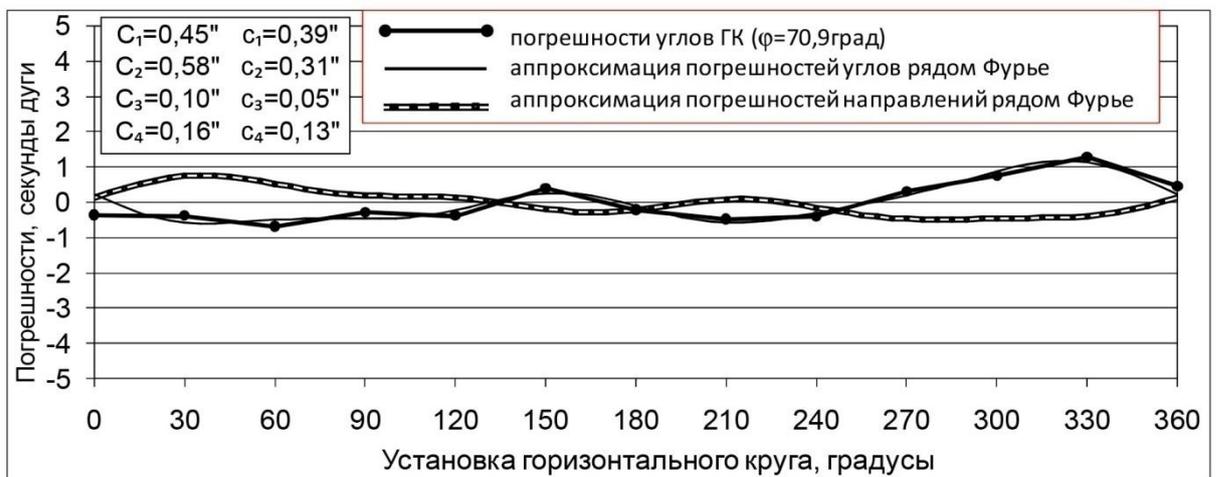


Рис. А2.3 – Погрешности ГУ и ГН (Leica 405power(5''))

Продолжение приложения А

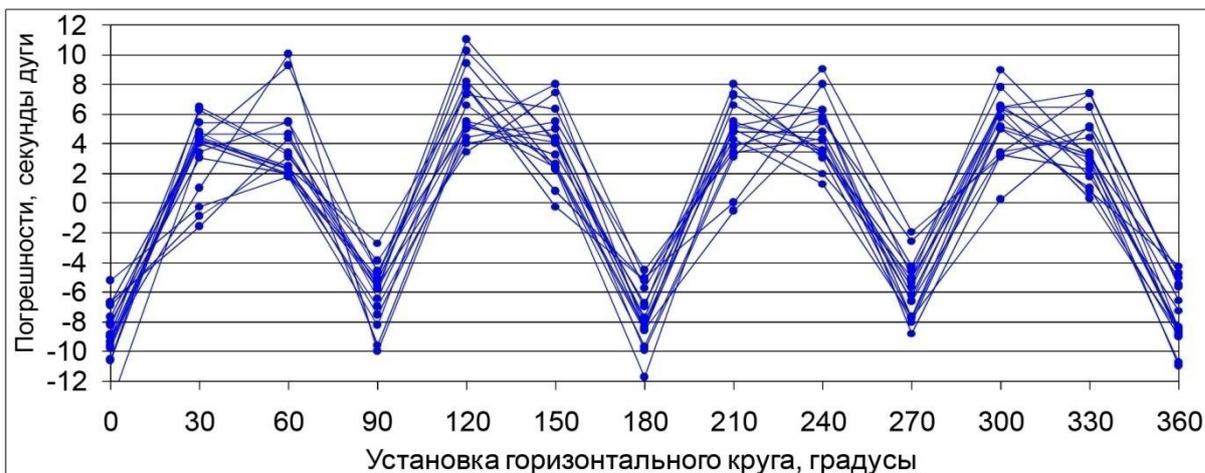


Рис. А3.1 – Уклонения ГУ (Тахеометр X(5"))

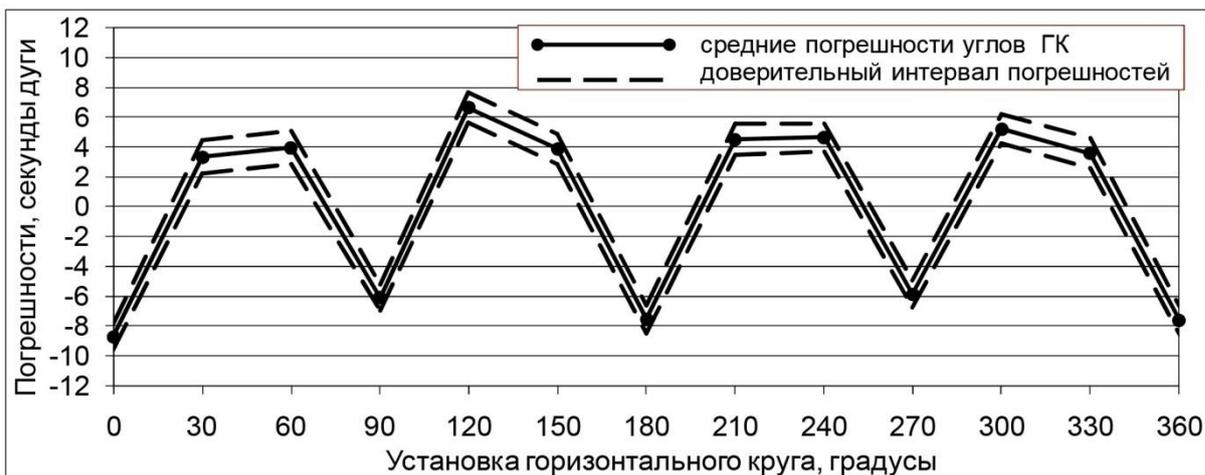


Рис. А3.2 – Погрешности ГУ (Тахеометр X(5"))

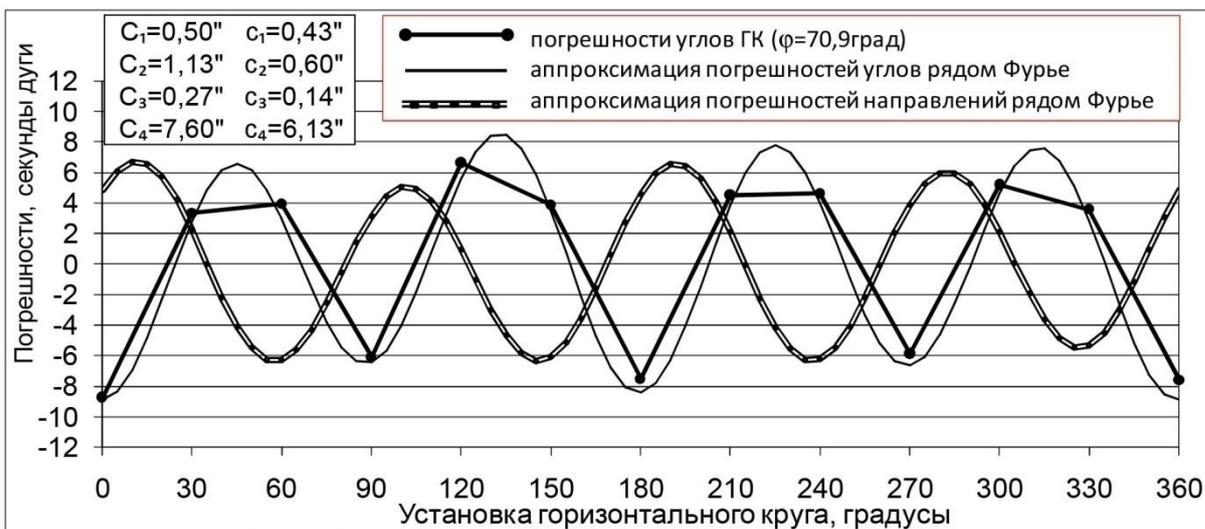


Рис. А3.3 – Погрешности ГУ и ГН (Тахеометр X(5"))

Продолжение приложения А

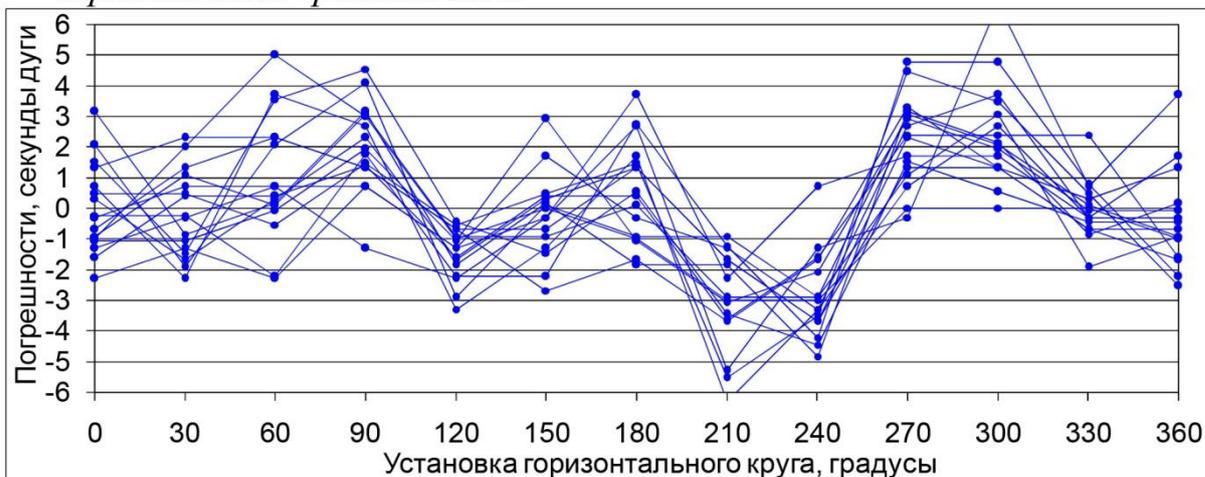


Рис. А4.1 – Уклонения ГУ (Spectra Precision 515(5''))



Рис. А4.2 – Погрешности ГУ (Spectra Precision 515(5''))

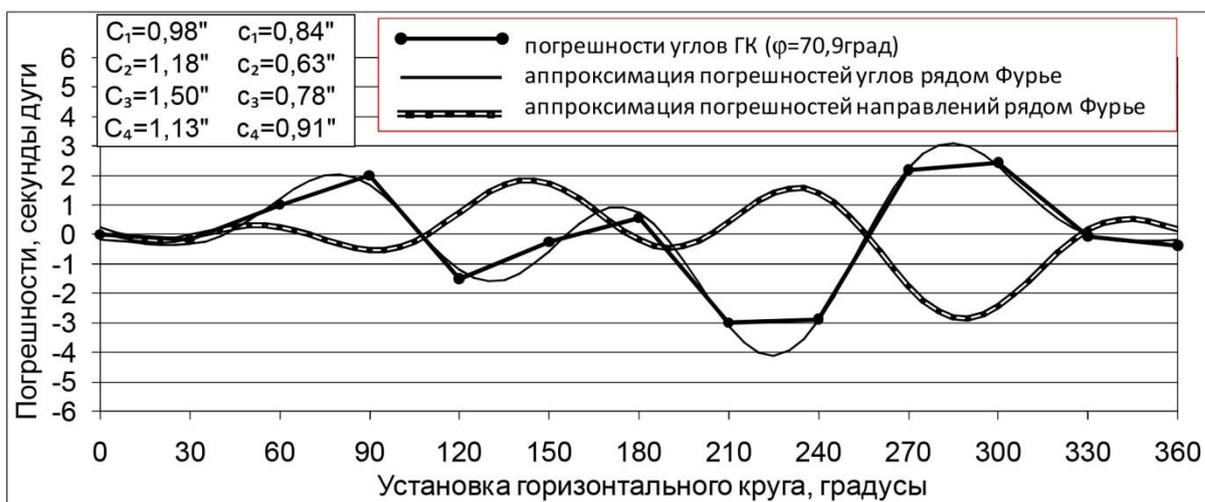


Рис. А4.3 – Погрешности ГУ и ГН (Spectra Precision 515(5''))

Продолжение приложения А

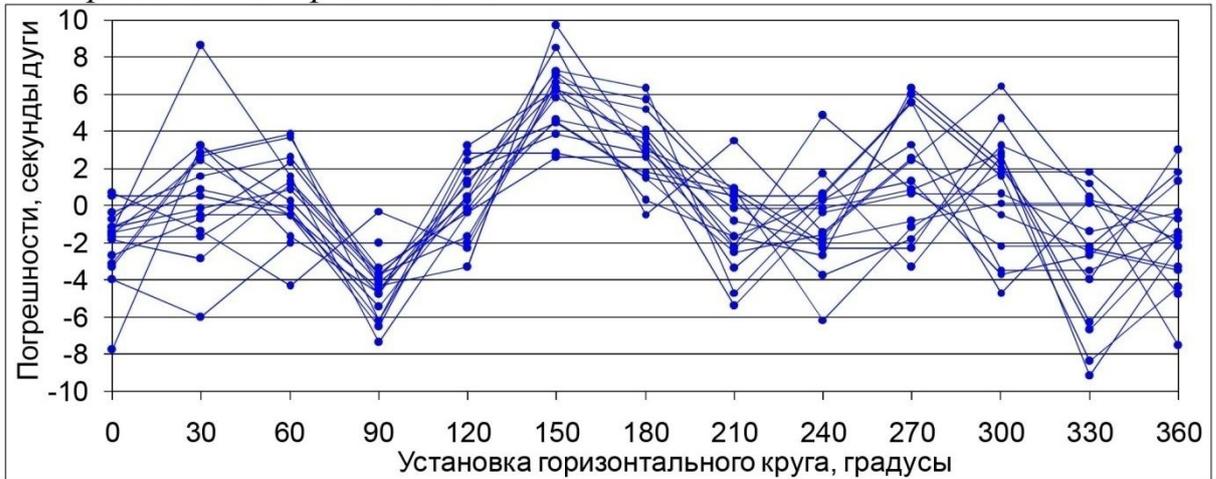


Рис. А5.1 – Уклонения ГУ (Trimble 3305DR(5''))

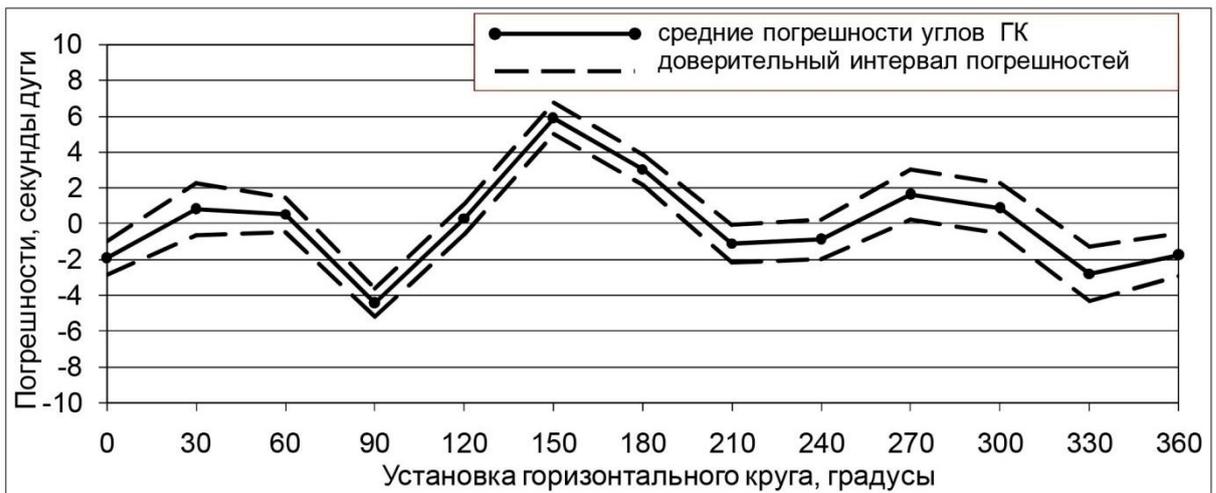


Рис. А5.2 – Погрешности ГУ (Trimble 3305DR(5''))

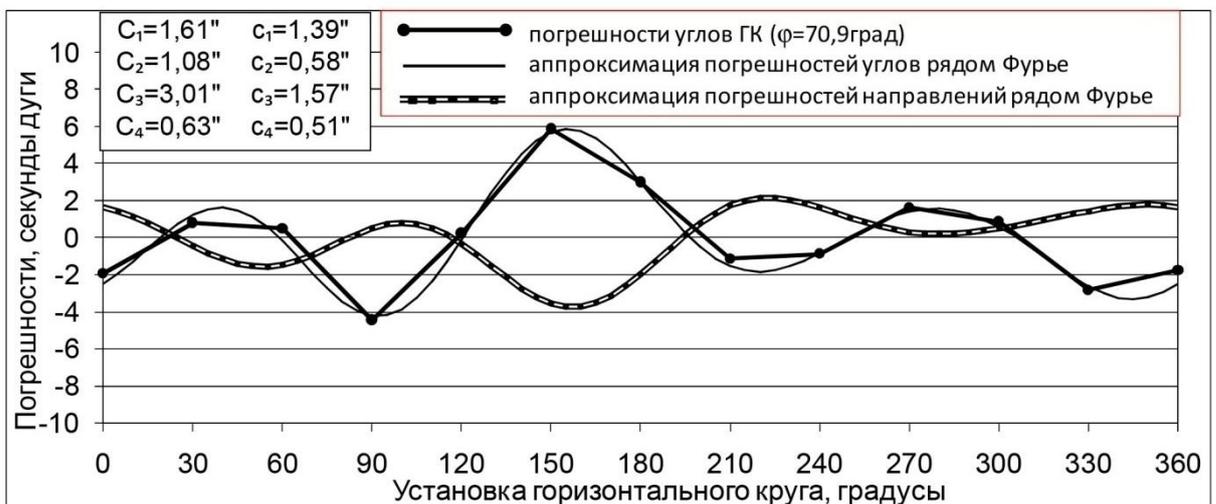


Рис. А5.3 – Погрешности ГУ и ГН (Trimble 3305DR(5''))

Продолжение приложения А

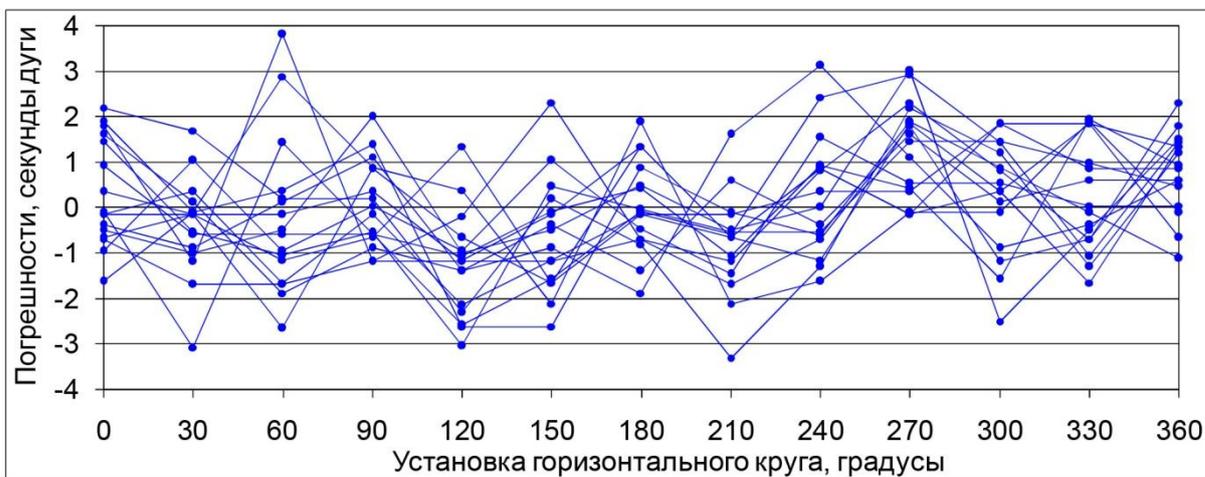


Рис. А7.1 – Уклонения ГУ (Nikon DTM 550(1''))

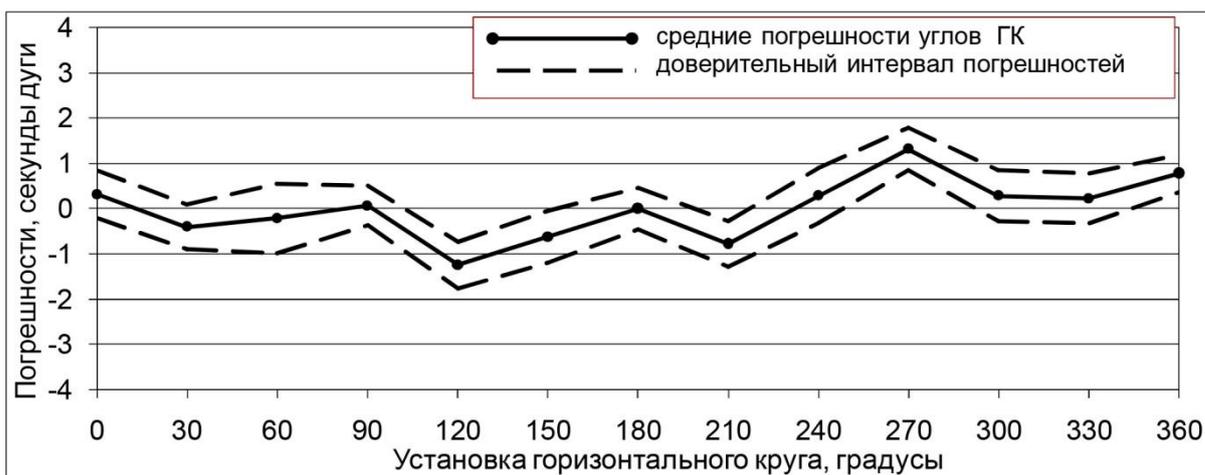


Рис. А7.2 – Погрешности ГУ (Nikon DTM 550(1''))

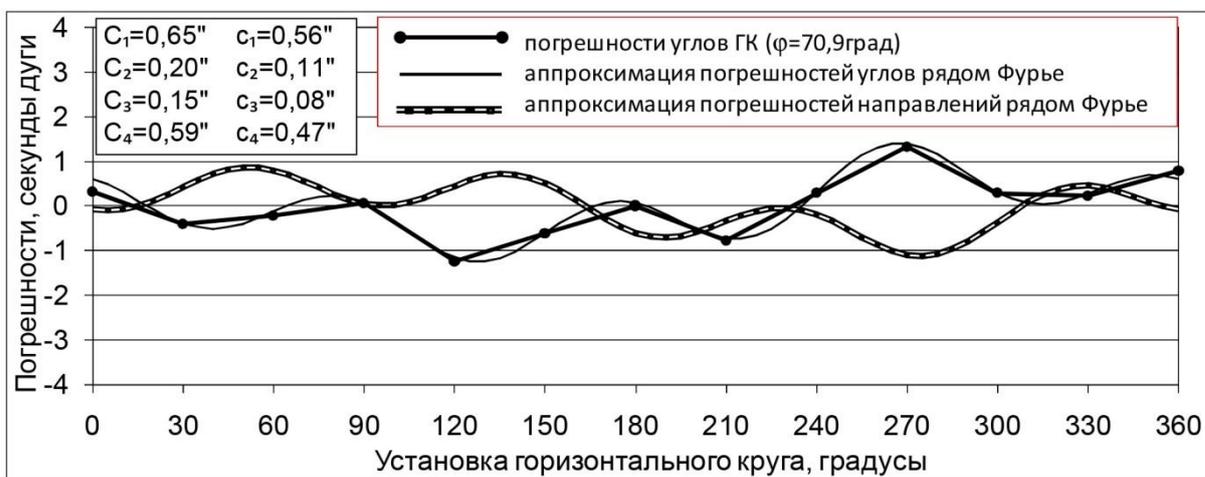


Рис. А7.3 – Погрешности ГУ и ГН (Nikon DTM 550(1''))

Продолжение приложения А

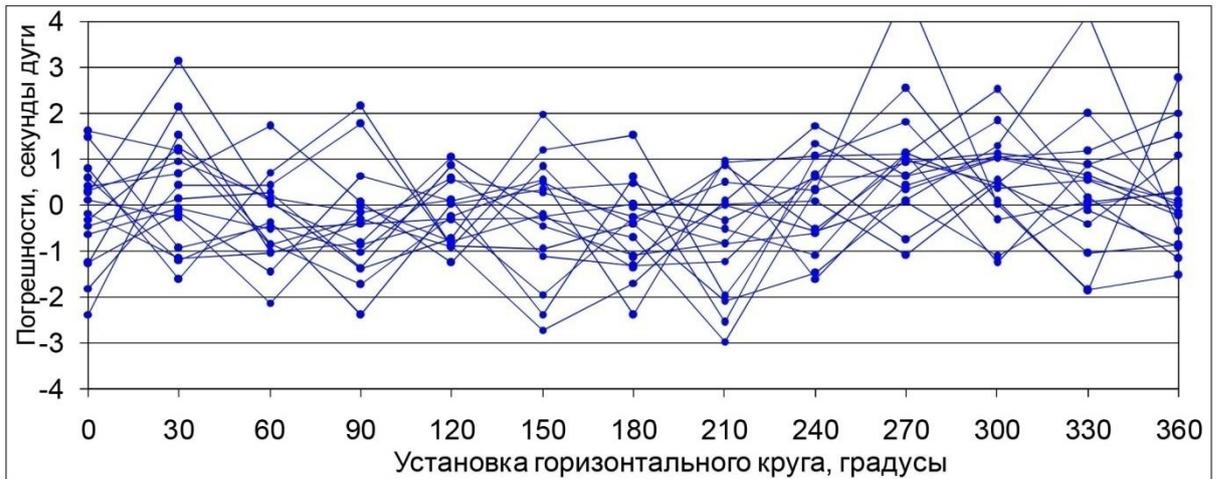


Рис. А8.1 – Уклонения ГУ (Leica TS06power(2''))

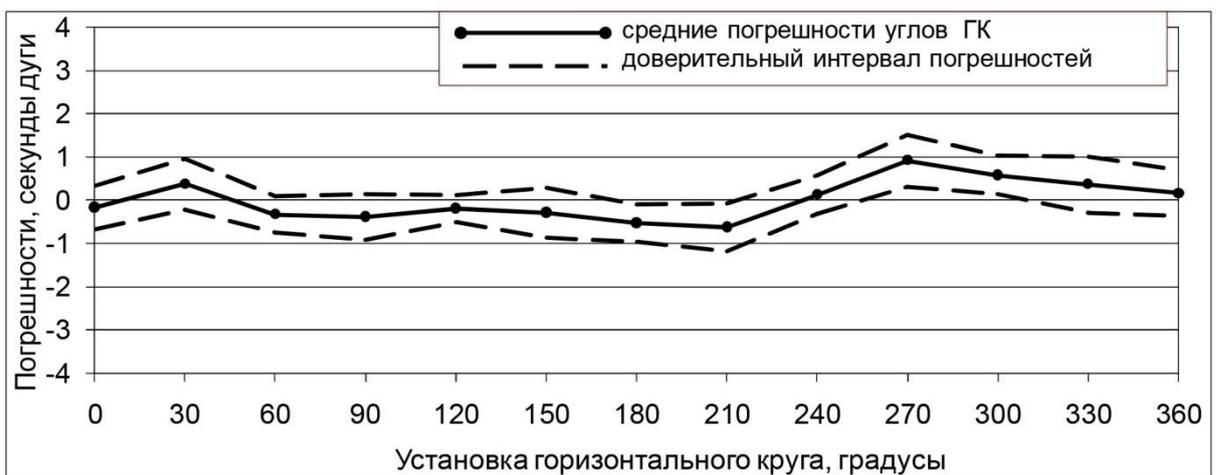


Рис. А8.2 – Погрешности ГУ (Leica TS06power(2''))

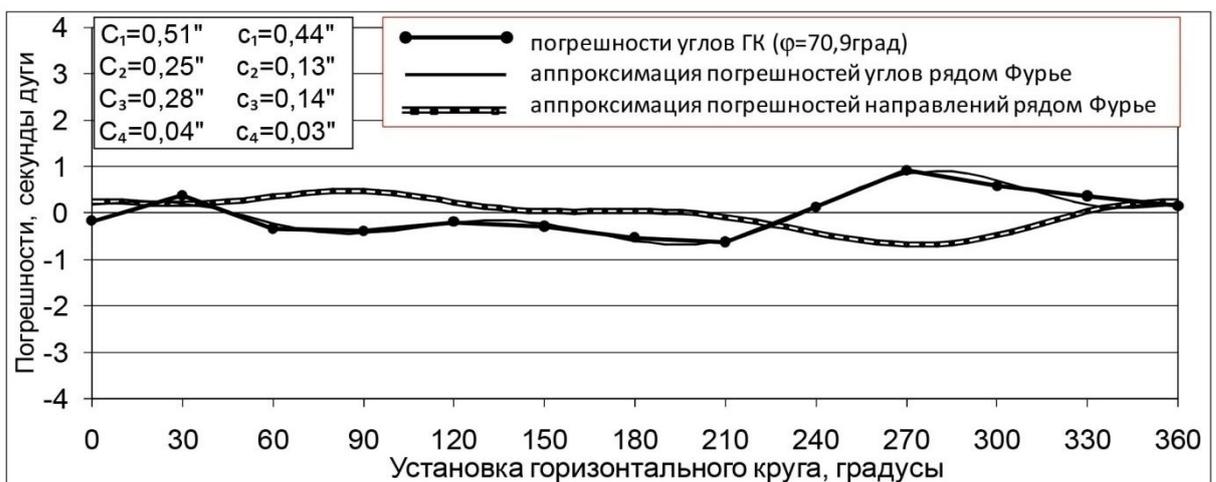


Рис. А8.3 – Погрешности ГУ и ГН (Leica TS06power(2''))

Продолжение приложения А

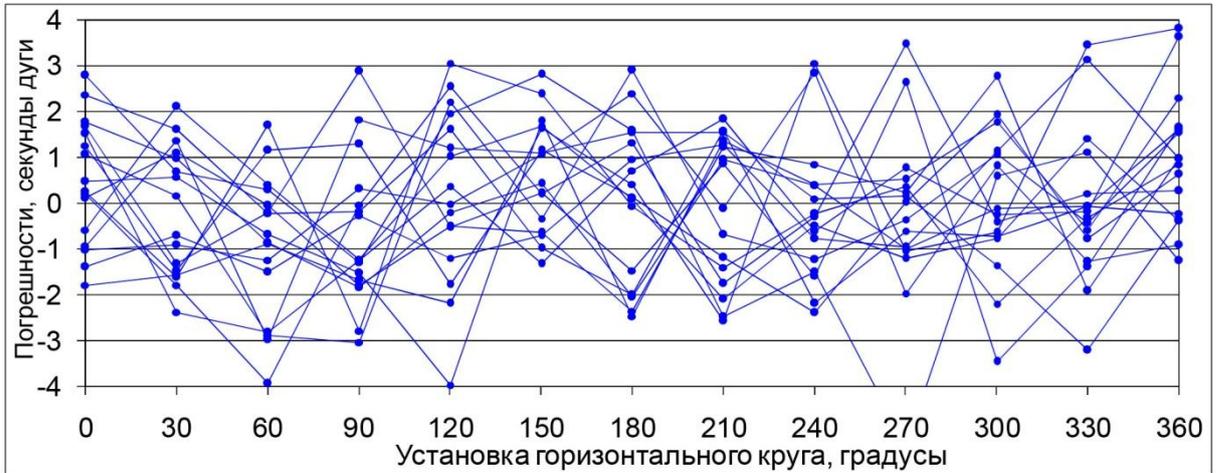


Рис. А9.1 – Уклонения ГУ (Leica TS06power(3''))

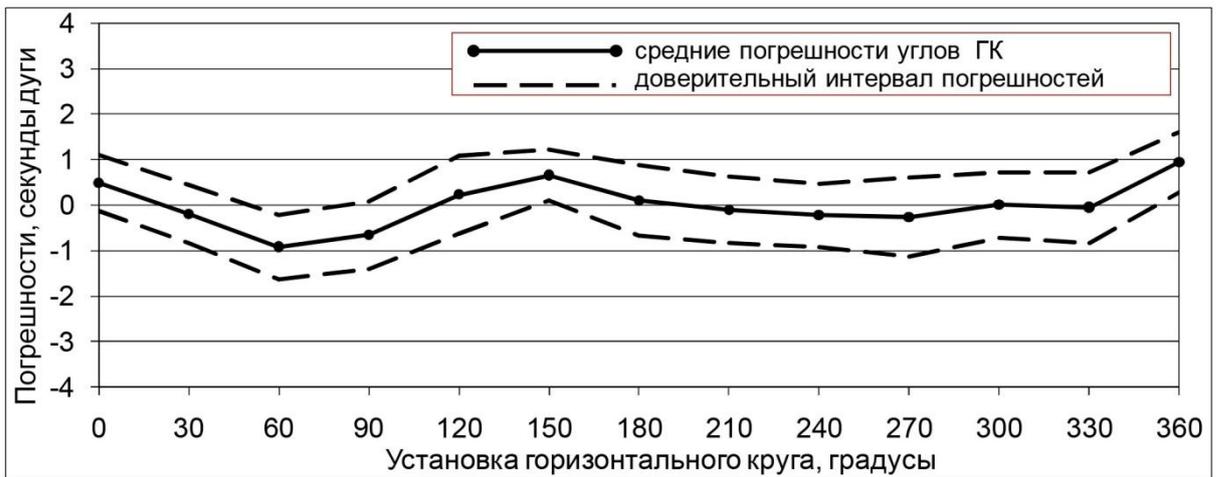


Рис. А9.2 – Погрешности ГУ (Leica TS06power(3''))

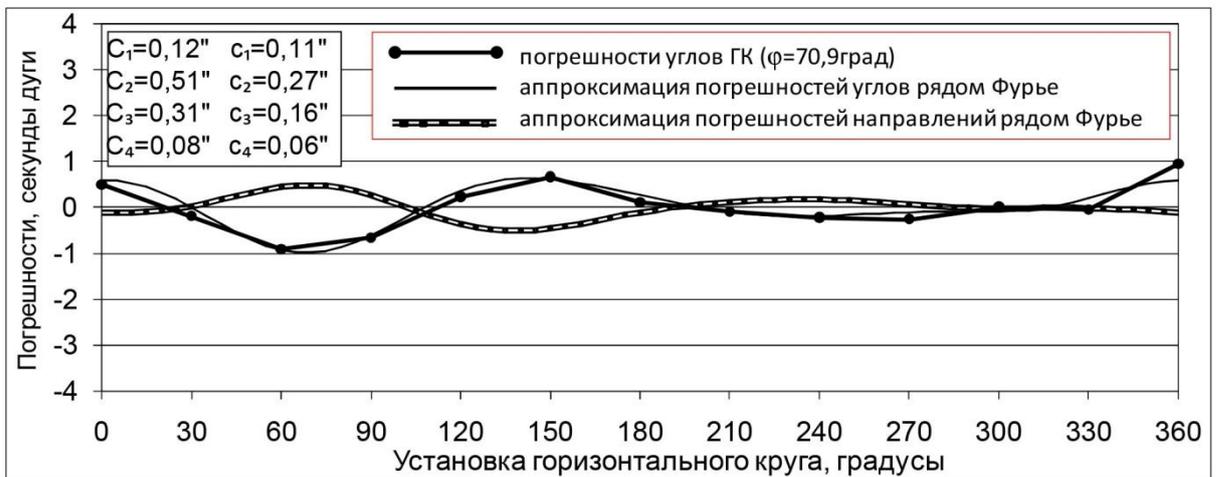


Рис. А9.3 – Погрешности ГУ и ГН (Leica TS06power(3''))

Продолжение приложения А

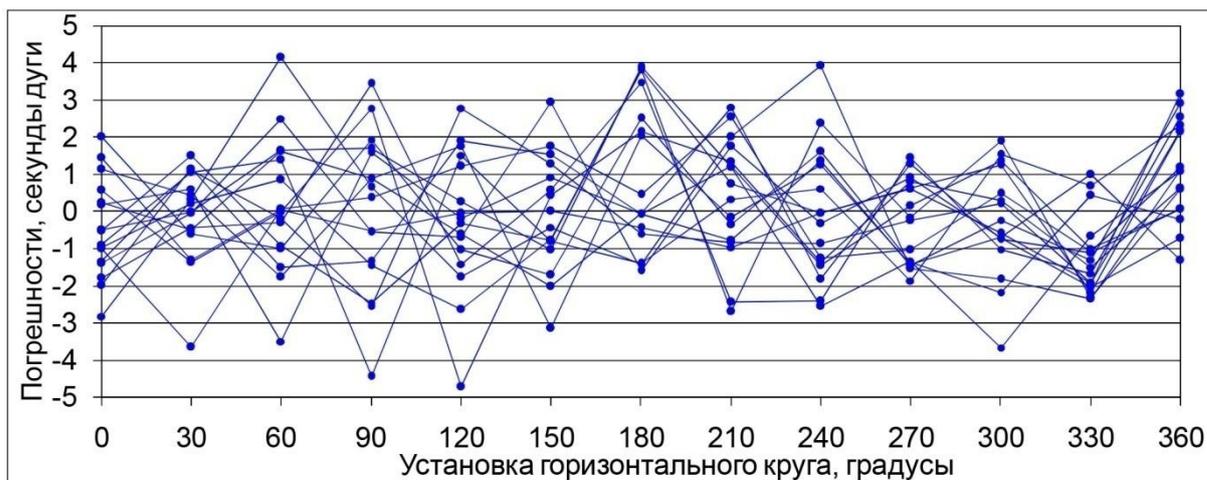


Рис. А10.1 – Уклонения ГУ (Leica TS06ultra(5''))

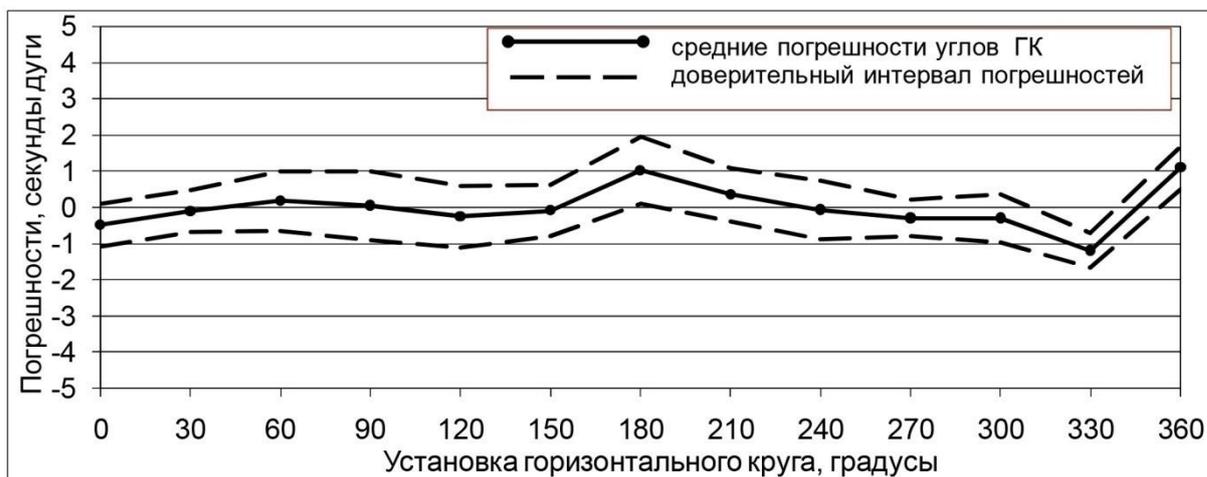


Рис. А10.2 – Погрешности ГУ (Leica TS06ultra(5''))

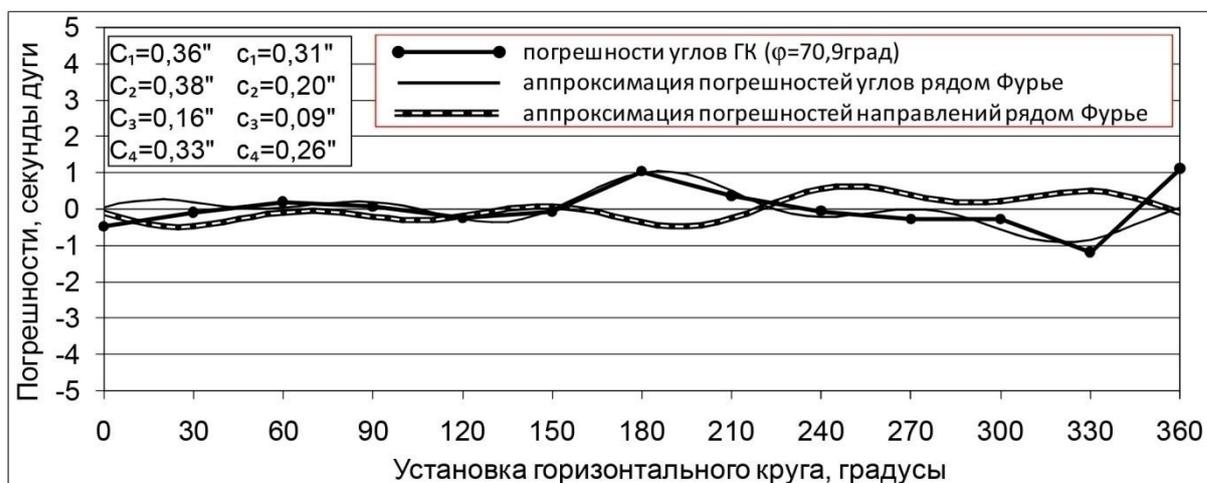


Рис. А10.3 – Погрешности ГУ и ГН (Leica TS06ultra(5''))

Продолжение приложения А

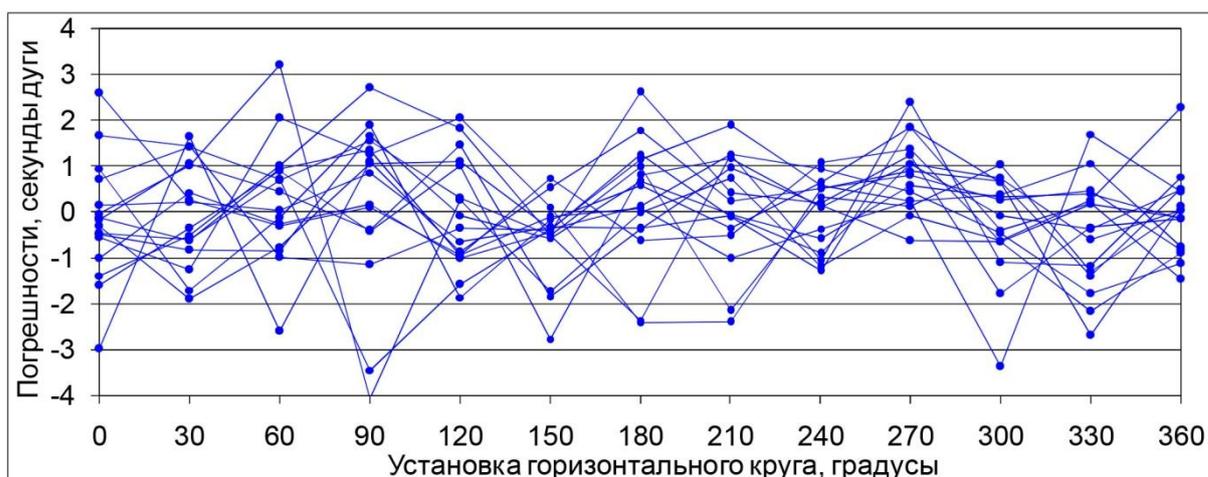


Рис. А11.1 – Уклонения ГУ (Leica Builder R100Mpower(9''))

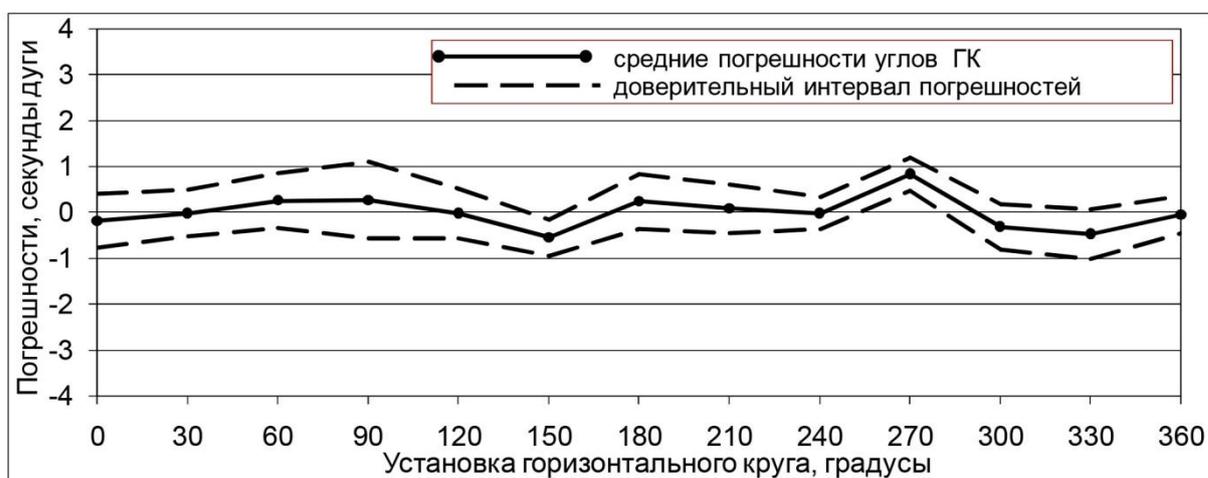


Рис. А11.2 – Погрешности ГУ (Leica Builder R100M(9''))

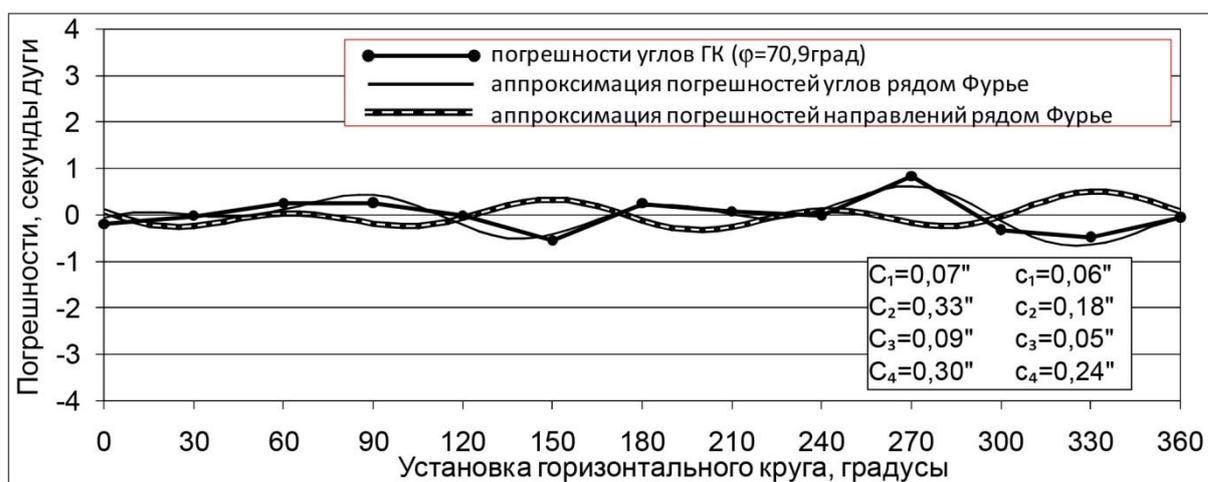


Рис. А11.3 – Погрешности ГУ и ГН (Leica Builder R100Mpower(9''))

Продолжение приложения А

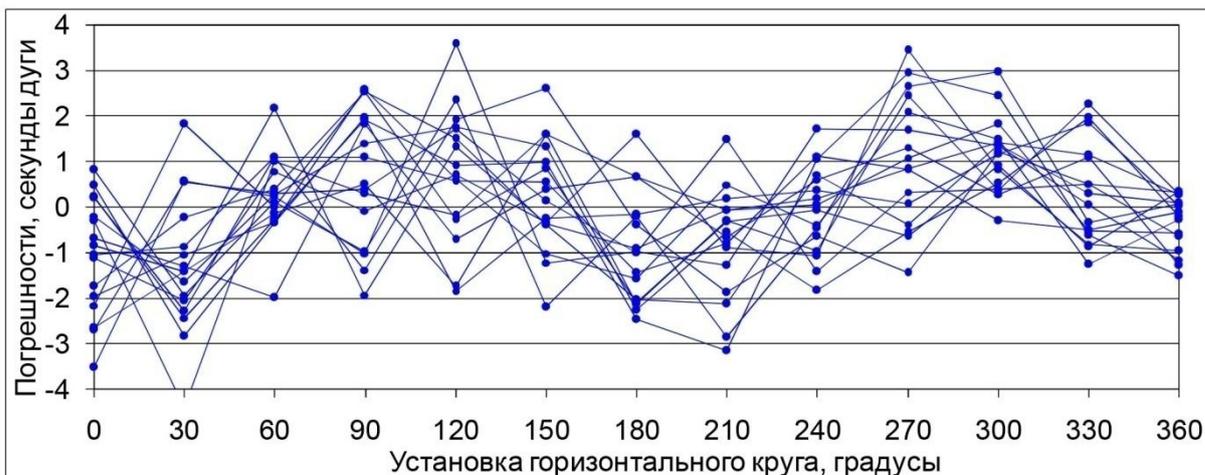


Рис. А12.1 – Уклонения ГУ (GeoMax ZTS605LR(5''))

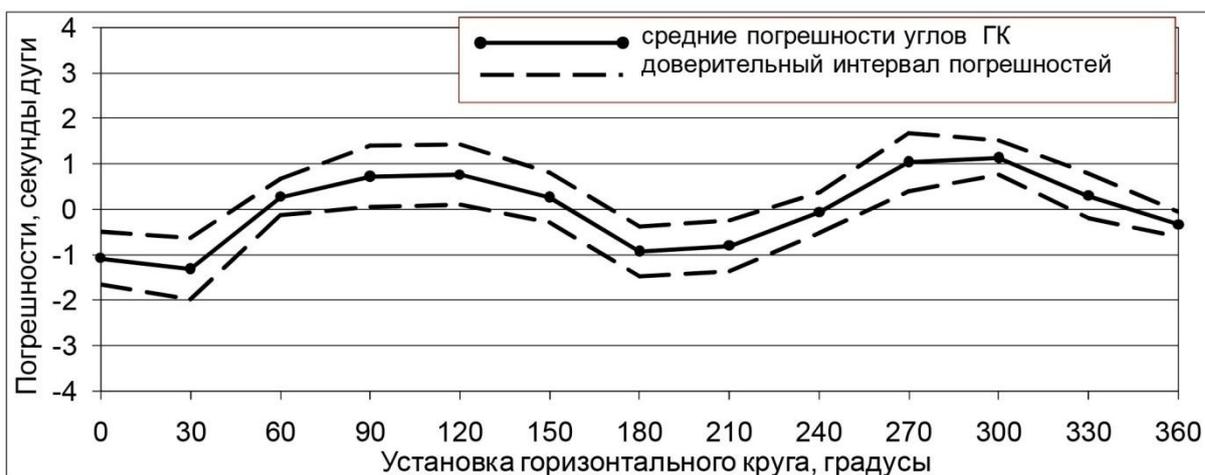


Рис. А12.2 – Погрешности ГУ (GeoMax ZTS605LR(5''))

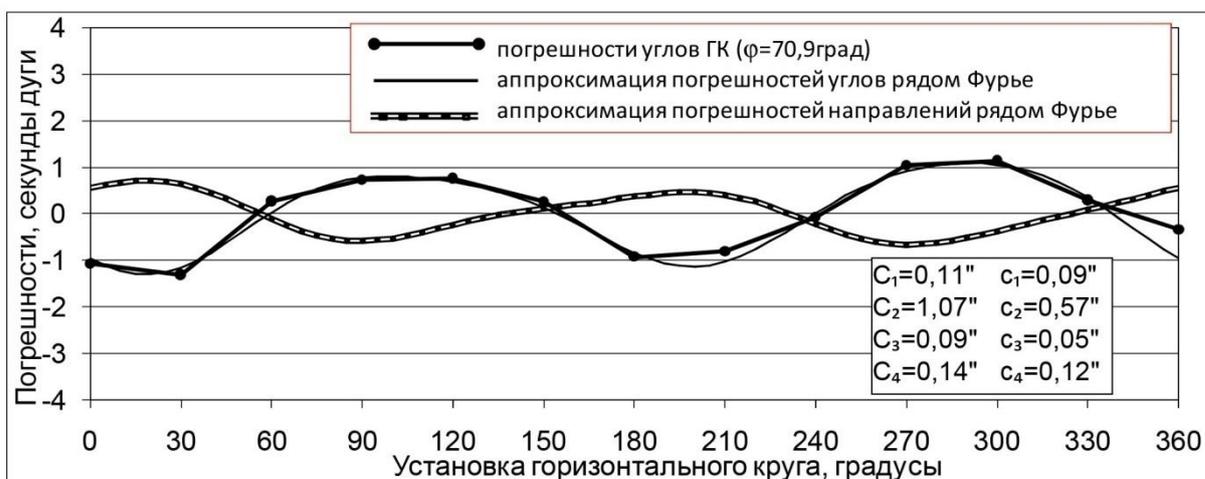


Рис. А12.3 – Погрешности ГУ и ГН (GeoMax ZTS605LR(5''))

Продолжение приложения А

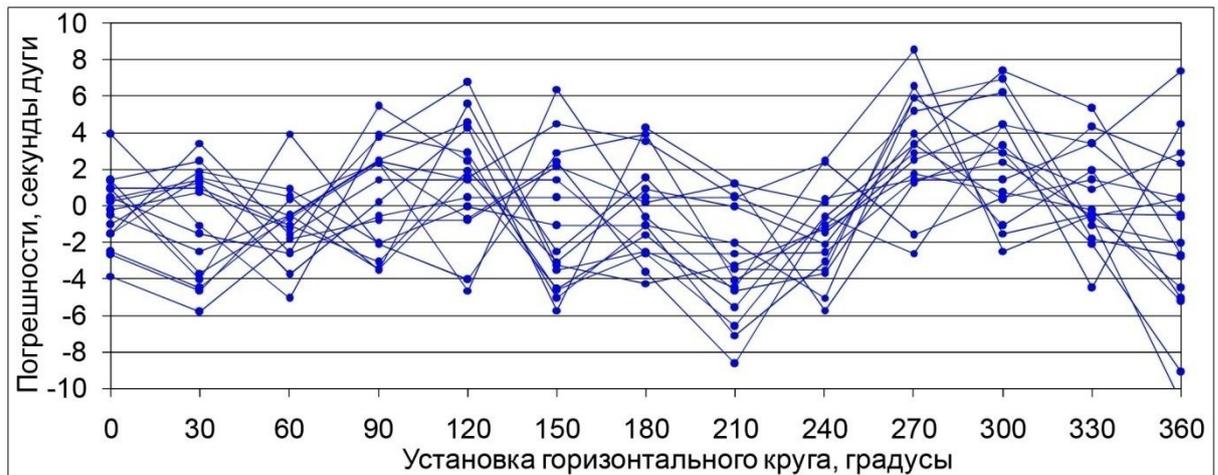


Рис. А13.1 – Уклонения ГУ (Sokkia SET630R(6''))

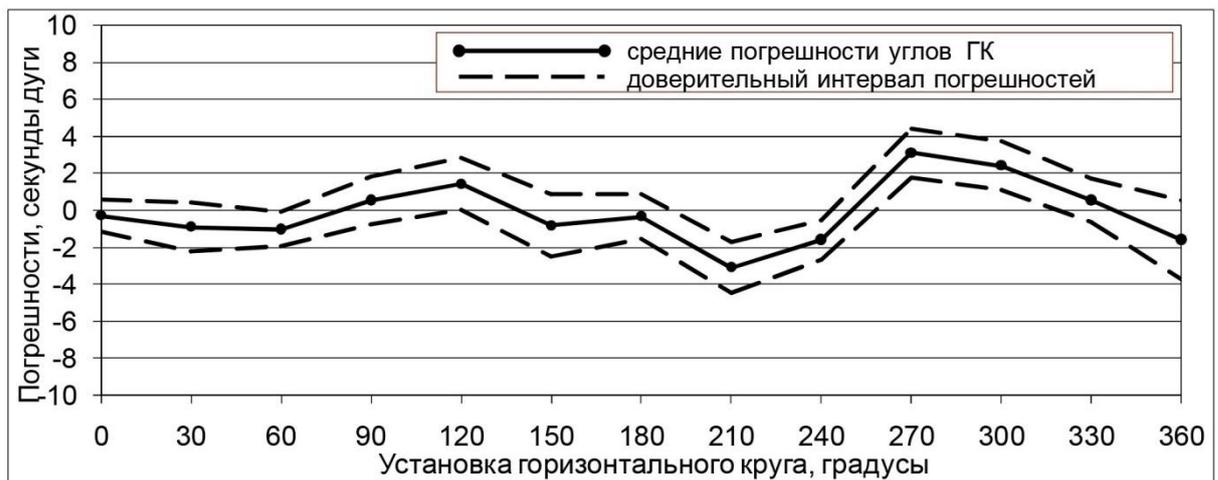


Рис. А13.2 – Погрешности ГУ (Sokkia SET630R(6''))

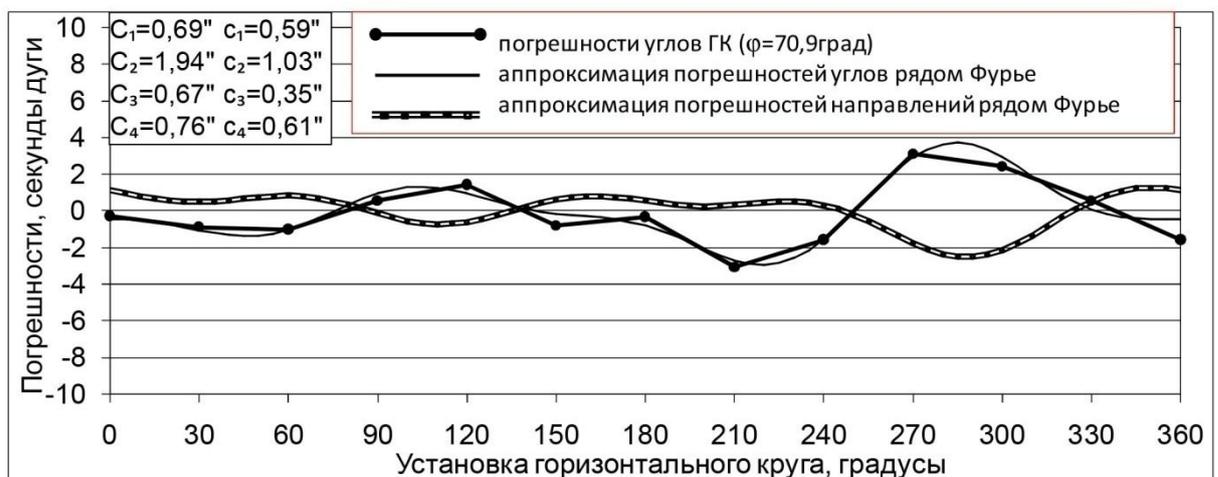


Рис. А13.3 – Погрешности ГУ и ГН (Sokkia SET630R(6''))

Продолжение приложения А

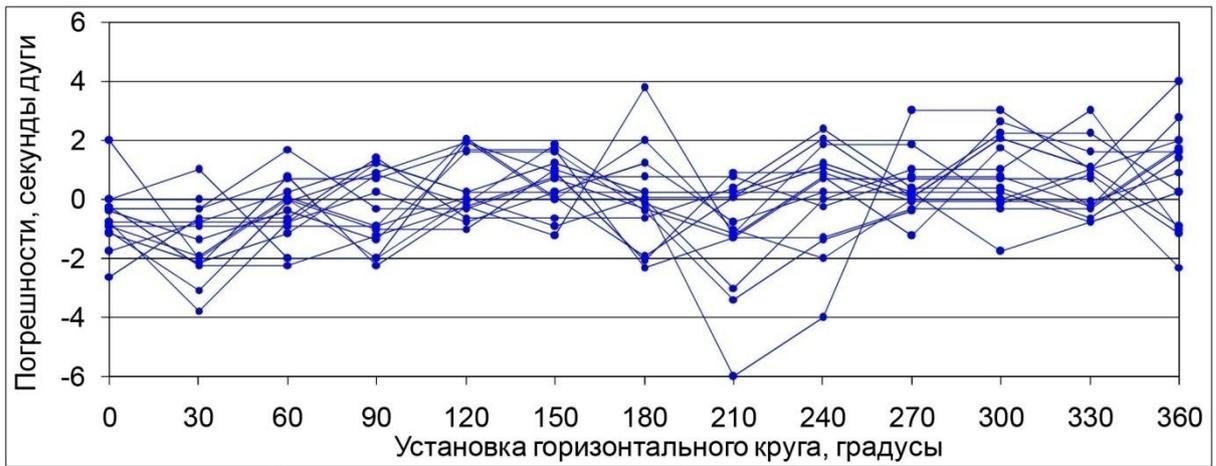


Рис. А14.1 – Уклонения ГУ (Торсон GTS 225(5''))

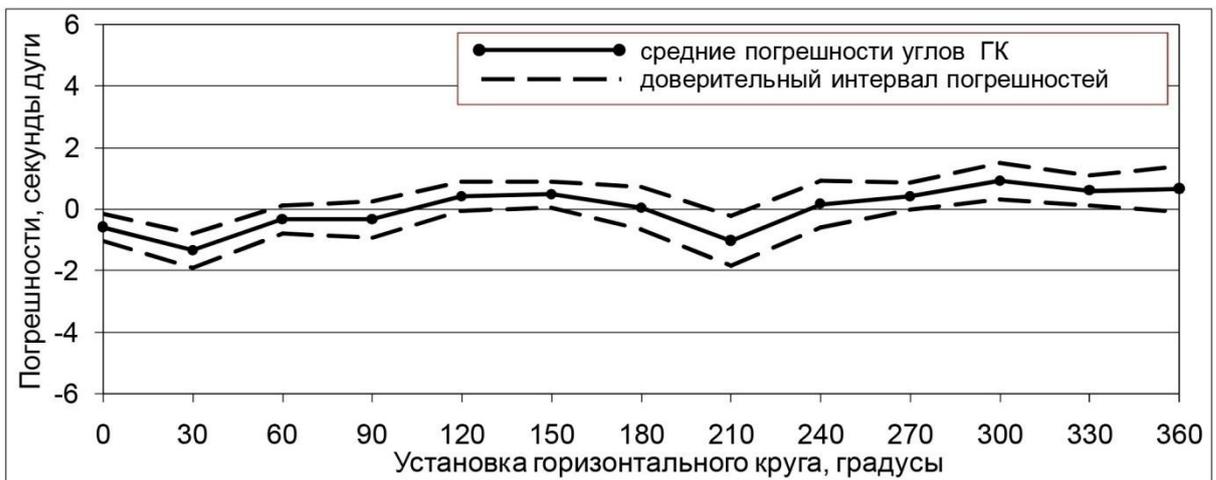


Рис. А14.2 – Погрешности ГУ (Торсон GTS 225(5''))

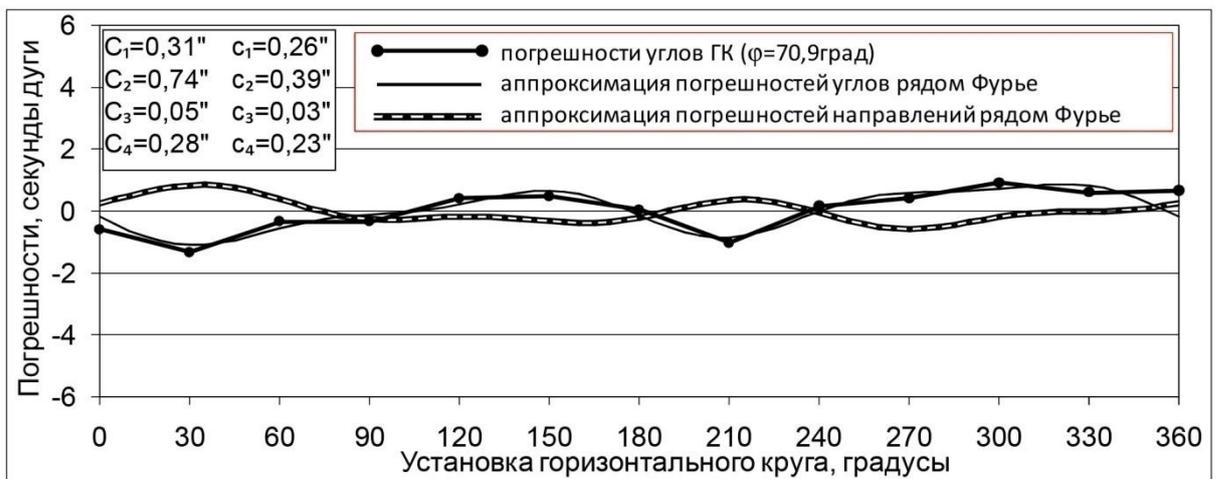


Рис. А14.3 – Погрешности ГУ и ГН (Торсон GTS 225(5''))

Продолжение приложения А

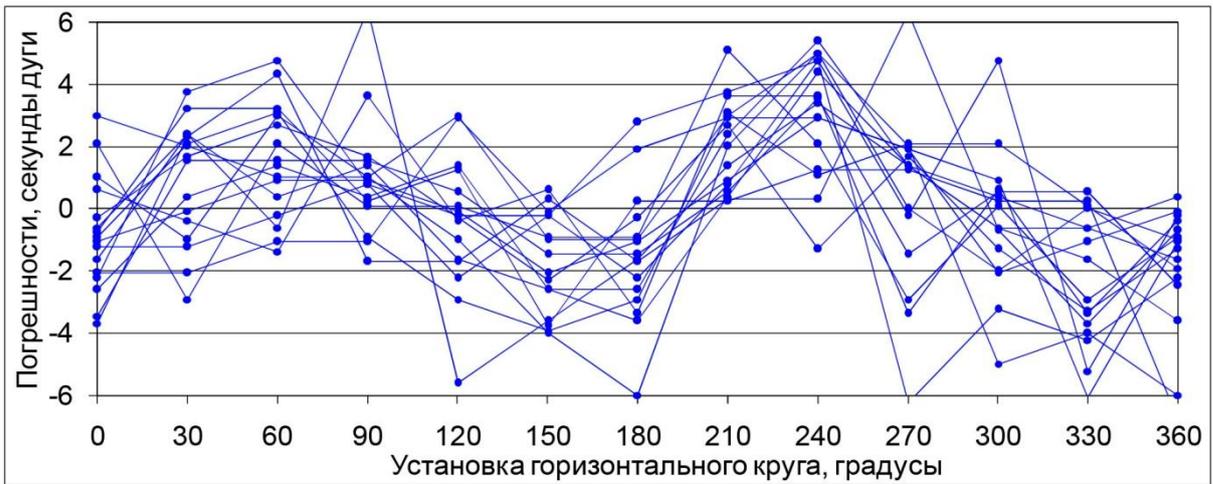


Рис. А15.1 – Уклонения ГУ (Stonex ST55GP(5''))

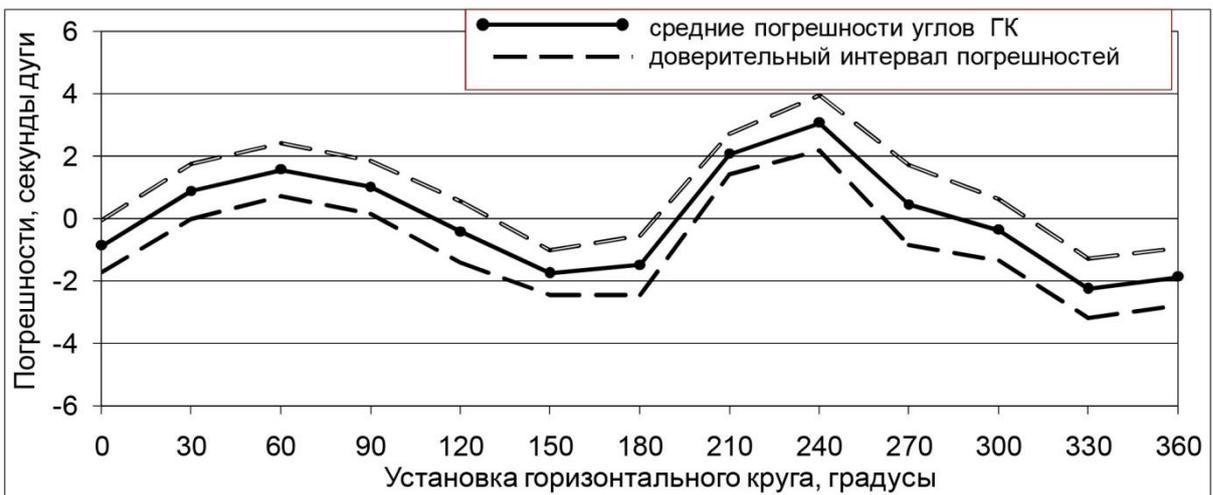


Рис. А15.2 – Погрешности ГУ (Stonex ST55GP(5''))

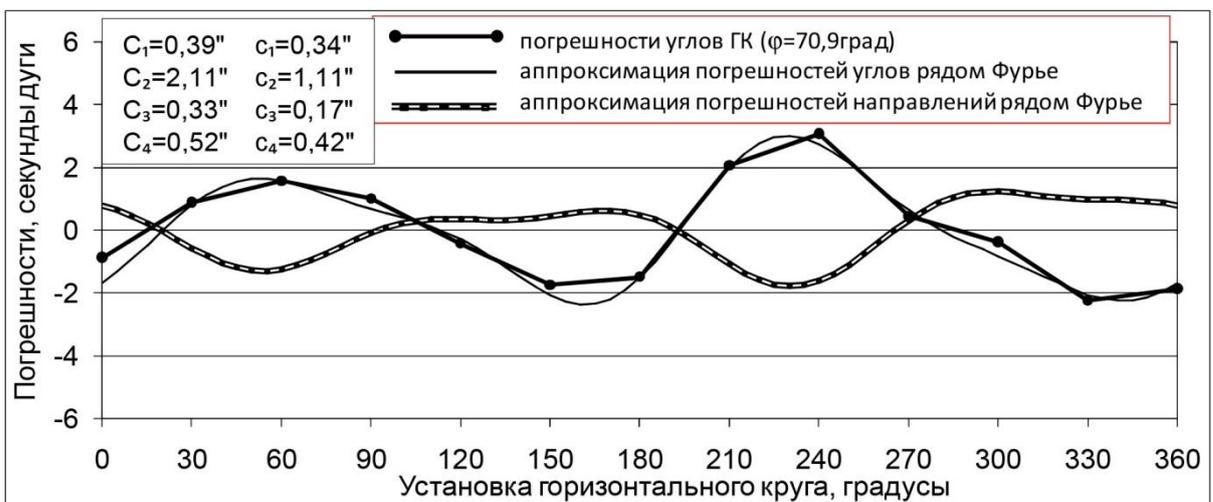


Рис. А15.3 – Погрешности ГУ и ГН (Stonex ST55GP(5''))

Таблица А.1 Распределение полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита

$x_i(t_j)$ \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
t	0°	3°	6°	9°	12°	15°	18°	21°	24°	27°	30°	33°	36°	39°	42°
$x_1(t_j)$	-1,00	1,49	0,45	-0,09	2,83	-0,12	1,01	2,02	1,05	-6,76	0,16	-0,28	0,46	-0,25	0,39
$x_2(t_j)$	-0,29	0,17	0,51	1,72	1,69	0,96	-0,23	0,85	1,10	1,27	0,54	-1,10	1,36	0,33	0,25
$x_3(t_j)$	1,64	1,59	0,48	0,28	1,95	0,74	0,36	-0,26	-0,72	0,72	0,72	0,09	1,13	1,09	-0,39
$x_4(t_j)$	0,97	1,54	0,29	1,12	1,38	1,75	0,74	43,83	1,25	0,46	0,18	0,36	-0,56	0,81	0,20
$x(t_j)$	0,330	1,198	0,432	0,758	1,962	0,832	0,470	0,860	0,670	0,422	0,375	0,018	0,598	0,495	0,112

Продолжение таблицы А1

$x_i(t_j)$ \ j	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
t	45°	48°	51°	54°	57°	60°	63°	66°	69°	72°	75°	78°	81°	84°	87°
$x_1(t_j)$	0,15	-0,50	-0,33	-1,57	-0,99	-2,22	-1,42	-0,36	-1,31	-0,77	-2,25	1,52	0,10	-1,82	-0,56
$x_2(t_j)$	-0,80	-0,42	-0,67	-0,68	-1,32	-2,54	-2,82	-0,74	-2,09	-1,49	-1,94	-1,95	-0,62	-0,23	-1,39
$x_3(t_j)$	-0,10	-1,61	-1,16	-1,71	0,18	-2,69	-1,75	-0,54	-2,05	-1,21	-0,23	-2,12	43,75	-2,61	-1,66
$x_4(t_j)$	0,23	-0,58	-1,86	-1,25	-0,27	-1,54	-2,38	-0,77	-0,36	-2,30	-1,14	-1,53	-1,18	-2,19	-1,72
$x(t_j)$	-0,130	-0,778	-1,005	-1,302	-0,600	-2,248	-2,068	-0,602	-1,452	-1,442	-1,390	-1,755	-0,612	-1,712	-1,332

Продолжение таблицы А1

$x_i(t_j)$ \ j	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
t	90°	93°	96°	99°	102°	105°	108°	111°	114°	117°	120°	123°	126°	129°	132°
$x_1(t_j)$	0,92	-1,27	0,71	0,45	-0,87	0,16	-0,25	0,86	0,73	0,10	-1,02	1,69	0,46	1,30	0,29
$x_2(t_j)$	-1,27	-1,09	-0,15	0,23	-1,87	-0,23	-0,41	-1,14	0,13	0,76	-0,58	1,13	0,25	0,99	0,90
$x_3(t_j)$	-1,99	-1,21	0,20	-1,16	-0,32	0,56	0,43	-0,13	-0,68	1,78	0,87	0,31	0,59	-0,05	1,13
$x_4(t_j)$	-0,28	-0,54	-0,35	-0,70	-0,05	0,13	-1,33	-0,70	0,04	-0,03	-0,21	0,07	-0,15	1,45	2,08
$x(t_j)$	-1,115	-1,028	0,102	-0,295	-0,778	0,155	-0,185	-0,402	0,055	0,652	-0,235	0,80	0,288	0,922	1,100

Продолжение таблицы А1

$x_i(t_j)$ \ j	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
t	135°	138°	141°	144°	147°	150°	153°	156°	159°	162°	165°	168°	171°	174°	177°
$x_1(t_j)$	0,00	-0,09	1,35	0,05	-0,77	-0,43	0,48	0,56	1,08	0,24	-0,06	0,84	0,12	1,86	0,76
$x_2(t_j)$	1,11	0,63	-0,25	1,45	-0,26	-0,04	-0,05	0,48	0,38	1,79	1,65	1,85	0,25	0,95	1,04
$x_3(t_j)$	0,72	0,19	1,96	-0,40	0,68	1,61	0,11	1,18	1,28	0,16	0,20	1,07	-0,05	-0,45	2,10
$x_4(t_j)$	0,01	1,30	0,84	-0,79	0,99	1,02	-0,58	-0,39	0,50	0,23	0,55	0,96	-0,01	1,81	1,65
$x(t_j)$	0,460	0,508	0,975	0,078	0,160	0,540	-0,010	0,458	0,810	0,605	0,585	1,180	0,078	1,042	1,388

Таблица А.2 Подсчет числа погрешностей, попавших в каждый интервал n_h .

h	x_{hcp}	n_h	z_h	$f(z_h)$	$\frac{c}{\delta} f(z_h)$	n_h	x_h^2
1	2	3	4	5	6	7	8
1	-2,565	6	-2,3346	0,0261	0,0135	3,24	0,56
2	-1,995	14	-1,8158	0,0767	0,0398	9,55	
3	-1,425 -	21	-1,2970	0,1721	0,0893	21,43	0,01
4	-0,855	26	-0,7882	0,2927	0,1518	36,43	2,99
5	-0,285	46	-0,2594	0,3858	0,2002	48,05	0,09
6	0,285	56	0,2594.	0,3858	0,2002	48,05	1,32
7	0,855	38	0,7882	0,2927	0,1518	36,43	0,07
8	1,425	20	1,2970	0,1721	0,0893	21,43	0,10
9	1,995	12	1,8158	0,0767	0,0398	9,55	0,02
10	2,565	1	2,3346	0,02611	0,0135	3,24	

237,40 $x^2=5,16$

Таблица А.3. Корреляционный анализ полных погрешностей диаметров горизонтального круга теодолита

$x_i(t_j)$ \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$x_1(t_j)$	-1,330	0,292	0,018	-0,848	0,868	-0,952	0,540	1,160	0,380	-1,182	-0,215	-0,298	-0,142	-0,745	0,278
$x_2(t_j)$	-0,620	-1,028	0,078	0,962	-0,272	0,128	-0,700	-0,010	0,430	0,848	0,165	-0,118	0,778	-0,165	0,138
$x_3(t_j)$	1,310	0,392	0,048	-0,478	-0,012	-0,092	-0,110	-1,120	-1,390	0,298	0,245	0,072	0,528	0,595	-0,502
$x_4(t_j)$	0,640	0,342	-0,142	0,362	-0,582	0,918	0,270	-0,030	0,580	0,038	-0,195	0,342	-1,162	0,315	0,088
$\Sigma x_i(t_j)$	0,000	-0,002	0,002	-0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	-0,002	0,002	0,000	0,002

Продолжение таблицы А.3.

$x_i(t_j)$ \ j	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$x_1(t_j)$	0,280	0,278	0,675	-0,268	-0,390	0,028	0,748	0,242	0,142	0,672	-0,860	0,235	0,712	-0,108	0,772
$x_2(t_j)$	-0,670	0,358	0,335	0,622	-0,720	-0,292	-0,752	-0,138	-0,638	0,048	-0,550	-0,095	-0,008	1,482	-0,058
$x_3(t_j)$	0,030	-0,832	-0,155	-0,408	0,780	0,442	0,318	0,062	-0,598	0,232	1,160	-0,365	-0,138	-0,898	-0,328
$x_4(t_j)$	0,360	0,198	-0,855	0,052	0,330	0,708	-0,312	-0,168	1,092	-0,858	0,250	0,225	-0,568	-0,478	-0,388
$\Sigma x_i(t_j)$	0,000	0,002	0,000	-0,002	0,000	0,002	0,002	-0,002	-0,002	-0,002	0,000	0,000	-0,002	-0,002	-0,002

Продолжение таблицы А.3.

$x_i(t_j)$ \ j	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
$x_1(t_j)$	0,195	-0,242	0,608	0,745	-0,092	0,005	-0,065	0,762	0,675	-0,552	-0,785	0,890	0,172	0,378	-0,810
$x_2(t_j)$	-0,155	-0,062	-0,252	0,525	-1,092	-0,385	0,595	-0,738	0,075	0,108	-0,345	0,330	-0,038	0,068	-0,200
$x_3(t_j)$	-0,875	-0,182	0,098	-0,865	0,458	0,405	0,615	0,272	-0,735	1,128	1,105	-0,490	0,302	-0,972	0,030
$x_4(t_j)$	0,835	0,488	-0,452	-0,405	0,728	-0,025	-1,145	-0,298	-0,015	-0,682	0,025	-0,730	-0,438	0,528	0,980
$\Sigma x_i(t_j)$	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	-0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	-0,002	0,002	0,000

Продолжение таблицы А.3.

$x_i(t_j)$ \ j	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$x_1(t_j)$	-0,460	-0,598	0,375	-0,028	-0,930	-0,970	0,490	0,102	0,270	-0,365	-0,645	-0,340	0,042	0,818	-0,628
$x_2(t_j)$	0,650	0,122	1,225	1,372	-0,420	-0,580	-0,040	0,022	-0,430	1,185	1,065	0,670	0,172	-0,092	-0,348
$x_3(t_j)$	0,260	-0,318	0,985	-0,478	0,520	1,070	0,120	0,722	0,470	-0,445	-0,645	-0,110	-0,128	-1,492	0,712
$x_4(t_j)$	-0,450	0,792	-0,135	-0,868	0,830	0,480	-0,570	-0,848	-0,310	-0,375	-0,035	-0,220	-0,088	0,768	0,262
$\Sigma x_i(t_j)$	0,000	-0,002	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,002	0,002	-0,002

Таблица А.4. Усредненные значения коэффициентов корреляции

τ	$D_x(t_j)$	$\delta_x(t_j)$	$\rho_x(t_j)$	τ	$D_x(t_j)$	$\delta_x(t_j)$	$\rho_x(t_j)$
1	2	3	4	1	2	3	4
1	1,426	1,194	1,000	31	0,508	0,713	0,054
2	0,471	0,686	-0,025	32	0,112	0,334	0,012
3	0,010	0,098	-0,041	33	0,215	0,464	-0,229
4	0,667	0,817	0,032	34	0,581	0,762	-0,231
5	0,389	0,624	-0,098	35	0,646	0,804	0,009
6	0,591	0,769	0,052	36	0,104	0,323	0,024
7	0,288	0,537	0,009	37	0,682	0,826	0,022
8	0,867	0,931	-0,153	38	0,428	0,655	-0,028
9	0,867	0,931	0,054	39	0,334	0,578	0,025
10	0,736	0,858	0,007	40	0,684	0,827	0,060
11	0,057	0,239	0,202	41	0,652	0,808	0,154
12	0,075	0,274	-0,061	42	0,558	0,747	-0,014
13	0,741	0,861	0,083	43	0,105	0,324	-0,212
14	0,346	0,588	-0,026	44	0,457	0,676	0,029
15	0,119	0,345	-0,009	45	0,552	0,743	-0,014
16	0,219	0,468	0,328	46	0,301	0,549	-0,601
17	0,312	0,559	-0,069	47	0,367	0,606	0,117
18	0,441	0,664	-0,141	48	0,876	0,936	0,052
19	0,209	0,457	-0,090	49	0,955	0,977	-0,181
20	0,462	0,680	-0,085	50	0,667	0,817	0,166
21	0,261	0,511	0,091	51	0,884	0,940	0,203
22	0,441	0,664	-0,120	52	0,194	0,440	-0,020
23	0,036	0,191	-0,216	53	0,417	0,646	0,142
24	0,659	0,812	-0,067	54	0,233	0,438	0,051
25	0,415	0,644	-0,007	55	0,626	0,791	0,063
26	0,817	0,904	0,144	56	0,567	0,753	-0,207
27	0,083	0,288	-0,019	57	0,208	0,456	-0,401
28	0,283	0,532	-0,042	58	0,018	0,136	-0,341
29	1,082	1,040	-0,016	59	1,164	1,079	-0,104
30	0,236	0,535	-0,038	60	0,364	0,603	0,996

ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI
YER RESURSLARI,
GEODEZIYA, KARTOGRAFIYA
VA DAVLAT KADASTRI
DAVLAT QO'MITASI



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ПО ЗЕМЕЛЬНЫМ РЕСУРСАМ,
ГЕОДЕЗИИ, КАРТОГРАФИИ И
ГОСУДАРСТВЕННОМУ КАДАСТРУ

MARKAZIY AEROGEODEZIYA
KORXONASI

100 000, Toshkent sh., Xalqobod ko'chasi, 8-uy.
Tel.: 8(371) 234-10-98, faks: 8(371) 234-10-90

ЦЕНТРАЛЬНОЕ АЭРОГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ

100 000, г.Ташкент, улица Халкабад, дом 8.
Тел.: 8(371) 234-10-98, факс: 8(371) 234-10-90

E-mail: magkuz@umail.uz

СПРАВКА

О внедрении результатов диссертационного исследования Шавкатовой Нозимы Жамшид кизи на тему «Исключение систематических погрешностей горизонтального круга электронного тахеометра применением ряда Фурье» на соискание академической степени магистра по специальности 5A311502 – «Геодезия и картография».

Настоящая справка дана Шавкатовой Нозиме Жамшид кизи в том, что она действительно, будучи магистрантом кафедры геодезии и кадастра Ташкентского архитектурно строительного института, проводила научное исследование, целью которого было экспериментально проверить наличие систематических погрешностей горизонтального круга электронных тахеометров в геомастерской «Марказий аэрогеодезия корхонаси».

Практическая значимость исследования Шавкатовой Н.Ж. заключается в том, что результаты исследований, представленные в диссертации, были внедрены в геомастерской «Markaziy aerogeodeziya korxonasi». Были исследованы несколько электронных тахеометров, имеющих на предприятии, и обобщены полученные результаты. Была выявлена реальная точность измерения горизонтальных углов у имеющихся приборов. Наиболее точный прибор в дальнейшем использовался для выполнения задач с повышенной точностью измерений.

Начальник геомастерской



Ю.М. Ибрагимов

РЕЦЕНЗИЯ

на диссертационную работу магистранта

Магистрант: Шавкатова Нозима Жамшид кизи

Специальность: 5А311502 – “Геодезия и картография”

Тема: Исключение систематических погрешностей горизонтального круга электронного тахеометра применением ряда Фурье

Тема обусловлена необходимостью дальнейшего совершенствования таких угломерных приборов как тахеометр, связанных с возрастающими требованиями к их точности и надежности. Возникает необходимость разработки новых методов и средств контроля их метрологических характеристик.

Наиболее востребованными на сегодняшний день становятся следующие виды работ, предполагающие высокоточные угловые измерения: создание государственных геодезических опорных и специальных плановых геодезических сетей для строительства уникальных сооружений, точное вынесение и закрепление осей при строительстве, геодезический мониторинг зданий и сооружений, обеспечение безопасности эксплуатации уникальных инженерных сооружений и многое другое. Вместе с тем, наблюдается недостаточная разработанность нормативно-технической документации, включающей в себя программы и порядок исследований погрешностей измерений электронными тахеометрами. Это и определяет актуальность темы диссертационной работы.

На сегодняшний день для геодезиста любой электронный тахеометр остается так называемым «черным ящиком», сохраняющим множество вопросов об особенностях его устройства, программном обеспечении, алгоритмах работы. Погрешности измерительных систем оптикоэлектронных углоизмерительных приборов имеют сложную природу и могут быть выявлены в результате экспериментальных исследований. Исследования, выполненные в работе, показывают, что погрешности носят, в основном,

гармонический характер, поэтому для их анализа применены разложения в ряды Фурье.

В работе последовательно изложены предложенные методы исследования погрешностей измерения горизонтальных углов электронных тахеометров. Рассмотрены основные вопросы исследования погрешностей горизонтального круга углоизмерительных приборов. Выполнен анализ полученных данных при помощи разложения в ряды Фурье, по результатам исследований составлены таблицы с результатами обработки измерений, графики погрешностей измерения горизонтальных углов и графики зависимости погрешностей измерения угла и направления от положения алидады и подставки тахеометра. По структуре работа состоит из 3 глав и содержит перечень использованных литературных источников.

Содержание работы показывает, что автор в достаточной степени обладает способностью самостоятельно решать научно-технические задачи, формировать научную гипотезу.

Выводы и предложения, представленные в работе точны, достаточно обоснованы и кратко сформулированы. В работе выполнены теоретические предпосылки и предложены методы исследования погрешностей измерения горизонтальных углов электронных тахеометров, с целью апробации предложенных методов выполнены экспериментальные исследования с использованием 16 приборов различных марок и разной, заявленной производителем, угловой точности.

Приведенный в работе список литературы использован уместно. По тексту диссертации приводятся ссылки на литературные источники.

Работа оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями. Приведенные в работе таблицы и графики выполнены на основе компьютерной программы и представлены в презентационной форме.

Допущенные в работе недостатки.

- 1) В главе I более подробно привести анализ работ отечественных ученых по вопросу темы диссертационной работы.
- 2) В главе II необходимо:
 - ✓ рисунки 2.7, 2.8 и 2.9 не читаемы, следовательно, их надо перерисовать;
 - ✓ в формулах разнообразить использование одноименных буквенных значений;
 - ✓ главу дополнить выводами.
- 3) В главе III следует сократить выводы
- 4) Диссертацию необходимо тщательно редактировать и подкорректировать.

Сделанные замечания не умаляют достоинство данной работы. Рецензируемая диссертационная магистерская работа отвечает предъявляемым требованиям по специальности 5А311502 – “Геодезия и картография” и заслуживает высокой оценки, а автор Шавкатова Нозима Жамшид кизи заслуживает присвоения степени магистра по специальности “Геодезия и картография”.

Рецензент:

ТИИИМСХ

Зав.Кафедрой «Геодезии и Геоинформатики»



Мусаев И.

ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

ОТЗЫВ

Научного руководителя магистерской диссертации

Магистрант: Шавкатова Нозима Жамшид кизи

Магистерская диссертация по теме: «Исключение систематических погрешностей горизонтального круга электронного тахеометра применением ряда Фурье» выполненный на кафедре «Геодезия и кадастр» состоит из содержания, введения, основной части (3 главы), заключения, списка использованной литературы и приложений

Выполняемые в диссертационной работе исследования основываются на анализе литературных данных, выполнении теоретических и практических исследований и экспериментальной проверке достоверности этих результатов. В первой главе приведен критический анализ нормативных документов и технической литературы относящихся к оптико-электронным углоизмерительным приборам. Во второй главе описывается теоретические основы разрабатываемых предложений, приводя историю проблемы, обосновывая необходимость проведения исследований, описывая технологии проведения исследований угломерных погрешностей электронных тахеометров. Выполнен анализ угловых измерений погрешностей разложением в ряд Фурье, преобразования погрешности угла в погрешности измеренного направления, оценки точности разложения в ряд Фурье. В третьей главе рассматриваются результаты проведенных исследований, проводится сравнительный анализ полученных результатов, обосновывается практическая значимость результатов проведенных исследований.

Исследованные автором методы и сформулированные им общие принципы исследования электронных тахеометров в условиях производства рекомендуется использовать для оценки точности измерения горизонтальных углов и вычисления поправок.

В ходе работы Шавкатова Н.Ж. проявила самостоятельность, дисциплинированность и ответственность относительно заданным ей

работам. Хорошо владеет иностранным языком, персональным компьютером и современными информационными технологиями.

Магистерская диссертационная работа Шавкатовой Н.Ж. отвечает предъявляемым требованиям, по структуре и содержанию полностью соответствует выданному заданию, является самостоятельным и законченным научным трудом, и заслуживает высокой оценки, а автор заслуживает присвоения академической степени магистра по специальности “Геодезия и картография”.



Научный руководитель:

к.т.н., доц. Ташпулатов С.А.

« 25 » 06 2018г.