На правах рукописи

Гура Дмитрий Андреевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ УГЛОВ

Специальность 25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Краснодар - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет», кафедра кадастра и геоинженерии

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент

Желтко Чеслав Николаевич

Официальные оппоненты:

Гайрабеков Ибрагим Гиланиевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова», проректор по учебно-воспитательной работе

Брынь Михаил Ярославович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Федеральное агентство железнодорожного транспорта, заведующий кафедрой «Инженерная геодезия»

Ведущая организация: ОАО Государственный специализированный проектный институт (ГСПИ) Госкорпорации «Росатом»

Защита состоится **«16» июня 2016 г. в 13 часов** на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» по адресу 105064, Москва, Гороховский пер. 4, зал заседаний Ученого совета. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии и на сайте:
http://miigaik.ru/nauka/dissertacionyy_sovet/dissertatsii/20160329214207-3313.pdf

Автореферат разослан «____» _____ **2016 г.**

Ученый секретарь
диссертационного совета Вшивкова Ольга Владимировна

Общая характеристика диссертации

Актуальность работы. 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.

Проводить всестороннее исследование приборов важно не только для фирм производителей, сервисных центров по обслуживанию приборов, научно-исследовательских институтов, но и для рядового пользователя, который при необходимости сможет определить, какой прибор позволяет выполнять измерения более точно. Наиболее востребованными на сегодняшний день становятся следующие виды работ, предполагающие высокоточные угловые измерения: создание государственных геодезических и опорных сетей, 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 диссертации.

Вопросами исследований электронных тахеометров занимались такие выдающиеся ученые, как Д.А. Аникст, К.М. Константинович, И.В. Меськин, Н.Х. Голыгин, Ю.Б. Парвулюсов, В.М. Зимин, М.М. Карсунская, Х.К. Ямбаев.

Разработанность темы исследования. Известен метод исследования погрешностей делений лимба и метод перестановки горизонтального круга при измерениях горизонтальных углов несколькими приемами для оптических теодолитов. Для электронных тахеометров подобных методов нет. В данной дис-

сертации взяты за основу упомянутые методы.

Основной целью работы является разработка методов исследования электронных тахеометров в условиях производства для оценки и повышения точности измерения горизонтальных углов.

Идея работы заключается в определении систематических погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами доступным в любой организации методом, последующем подборе наиболее подходящего по точности для данного вида работ электронного тахеометра или введении поправок в измеренные горизонтальные углы, если точность прибора недостаточна.

Основные научные задачи работы:

1. Разработать метод определения систематических погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами.

2. Разработать метод исследования упругих деформаций подставки электронных тахеометров в процессе выполнения измерений.

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

Объектом исследования является процесс измерений электронным тахеометром.

Предметом исследования являются систематические погрешности измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами.

Основные результаты работы:

1. Разработан метод определения систематических погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами.

2. Разработан метод исследования упругих деформаций подставки электронных тахеометров в процессе выполнения измерений.

3. Разработаны программы для ЭВМ и базы данных, позволяющие оптимизировать процесс обработки результатов измерений горизонтальных углов, полученных разными моделями электронных тахеометров в разных форматах.

Научная новизна работы:

1. Впервые совместно применены способы разворота подставки тахеометра на штативе (столбе) на заданные углы и измерения неизменного горизонтального угла с целью определения систематических погрешностей измерения угла для разных участков горизонтального круга.

2. Выведены формулы преобразования погрешностей измерения горизонтального угла в погрешности направления для полного оборота горизонтального круга с целью оценки точности работы прибора, выявления лучших приборов или введения поправок в измерения.

3. Разработан метод исследований возможных поворотов (упругих деформаций) подставки тахеометра как вокруг горизонтальной оси (повороты в вертикальной плоскости), так и вокруг вертикальной оси (азимутальные повороты), позволяющий оценить влияние неуравновешенности алидады тахеометра.

Практическая и теоретическая значимость работы. Разработанные методы исследования электронных тахеометров могут быть реализованы пользователем в условиях производства 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. Разработанные методы и алгоритмы могут применяться для совершенствования метрологического и нормативно-технического обеспечения геодезического производства.

Методология и методы исследования. В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с методологией исследования электронных тахеометров. Разработанные методы подтверждены экспериментальными данными. Для исследования использовались 16 электронных тахеометров разной точности и различных производителей. При решении поставленных в диссертации задач использовались численные методы и методы сравнительного анализа. Применён метод спектрального анализа - разложение в ряд Фурье. Математические

вычисления выполнялись в среде Microsoft Excel с использованием Visual Basic.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Доказано, что метод исследования погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами, разработанный автором, позволяет выявить систематические погрешности измерения горизонтальных углов современными электронными тахеометрами.

2. Обоснован метод преобразования погрешностей измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами в погрешности направлений.

3. Доказано, что неуравновешенная алидада приводит к возникновению упругих деформаций неподвижной части электронных тахеометров, достигающих в горизонтальной плоскости величины в 4-5″, а в вертикальной плоскости - до 45″.

Достоверность научных положений. Приведенные в диссертации исследования основаны на анализе научных источников по избранной теме, выполнении теоретических и практических исследований, экспериментальной проверке достоверности полученных результатов. Обработка результатов измерений и их анализ выполнены на основе методов математической статистики и теории погрешностей измерений.

Апробация результатов исследования. Основные положения и выводы проведенных исследований докладывались на международных, всероссийских и региональных научных и практических конференциях по проблемам геодезии, строительства, техническим наукам (г. Ростов-на-Дону, Ставрополь, Таганрог, Киев), на заседаниях кафедр кадастра и геоинженерии КубГТУ, прикладной геодезии МИИГАиК.

Результаты диссертационных исследований докладывались на конкурсе проектов НИОКР в рамках программы «У.М.Н.И.К.», по итогам которого получена грамота и выиграно финансирование исследования в течение двух лет.

Основные положения диссертации могут применяться при выполнении геодезических задач повышенной точности. Разработанные методы использу-

ются при исследовании приборов и при производстве геодезических работ в компаниях ООО «Навгеоком-Юг», ООО «ГеоСервис» в г. Краснодар.

Личный вклад автора состоит в самостоятельной разработке приведенных в диссертации методов исследования угломерных погрешностей электронных тахеометров. Автором самостоятельно выполнено не менее 90% экспериментальных измерений 16-ю электронными тахеометрами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, 6 из них в журналах, рекомендованных ВАК. Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 3 свидетельства государственной регистрации базы данных.

Объем и структура работы. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка используемых источников, трех приложений. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включает 14 таблиц, 99 рисунка, 78 формул. Список литературы содержит 164 наименования, в том числе 27 иностранных источников.

Содержание диссертации

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации и основные направления исследований, сформулирована цель работы и ее научная новизна.

В первом разделе «Состояние вопроса исследования оптико-электронных углоизмерительных приборов» проведен анализ исследований, выполненных разными учеными, оптико-электронных углоизмерительных приборов. Рассмотрены ряд стендов и систем, применяемых для проверки метрологической надежности электронных тахеометров, теодолитов и других приборов для измерения углов. Сделаны выводы о том, что многие существующие методы измерений не исключают влияния инструментальных погрешностей и не содержат полноценного контроля процесса измерений. В разделе анализируются источники погрешностей измерений и различные пути уменьшения их влияния.

Современное производство геодезических измерений предполагает повышение требований к обеспечению точности измерений углов. Вместе с тем не имеется доступных для пользователя методов исследования погрешностей измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами. В условиях отсутствия специальной лаборатории без проведения исследований пользователь вынужден полагаться на гарантии фирмы изготовителя. Пользователь не может оценить реальную точность прибора, выбрать более точный прибор, если их несколько и заявленная производителем точность у них одинаковая.

Во втором разделе «Теоретические основы разрабатываемого метода» выводятся формулы, и описывается технология реализации разработанного метода. Приведена история возникновения проблемы, обосновывается необходимость проведения исследований. Выведены формулы разложения угломерных погрешностей в ряды Фурье, преобразования погрешностей измерения угла в погрешности направления, оценки точности разложения в ряд Фурье. Предложен и обоснован способ исключения погрешностей разных гармоник.

Разработанный метод заключается в следующем. При исследованиях тахеометром измеряют горизонтальный угол между направлениями на 2 коллиматора (рис. 1). Угол между коллиматорами составляет около 70°. Измерения выполняют с перестановкой подставки на штативе через 30°. 13 измерений от 0° до 360° условно считают циклом измерений.

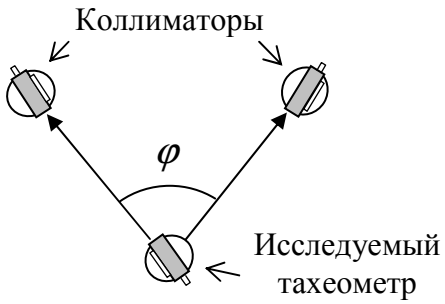

Рис. 1 - Схема измерений

В автореферате приведены основные формулы, полученные в диссертации.

Пусть в одном цикле имеем 13 измерений одного и того же угла β_i на разных установках горизонтального круга α_i

$$\alpha_i = 30^{\circ}(i-1), \qquad (1)$$

где i = 1, 2, … , 13.

Установка - это отсчёт по горизонтальному кругу при наведении на левый коллиматор (направление). Начальное ориентирование лимба в каждом цикле

измерений проводилось путем установки разъема для передачи данных с тахеометра в створе на левый коллиматор. Так как первое и последнее измерения угла в каждом цикле выполняют на установке 0°, оба измерения усреднялись и в дальнейшую обработку включались 12 измерений. При этом нельзя обойтись без последнего 13-го измерения в цикле, так как оно является замыканием и контролем неизменности измеряемого угла.

Найдём среднее значение угла для одного цикла

$$\beta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{12} \beta_i}{12} \qquad (2)$$

и отклонения от среднего

$$\Delta_i = \beta_i - \beta_{cp}. \qquad (3)$$

В отклонениях Δ_i содержатся случайные и систематические погрешности. Однако целью разработки методов исследования является выявление систематических погрешностей. Уменьшение случайных погрешностей достигается большим числом измерений на каждой установке, минимальной длительностью измерений в полуприеме и полным однообразием всех 13 измерений в цикле.

Предполагая, что зависимость отклонений Δ_i от установки α_i является периодической функцией $F(\alpha)$ в интервале 0...360°, разложим её в ряд Фурье

$$F(\alpha) = \sum_{k=1}^{l} (A_k \cos k\alpha + B_k \sin k\alpha), \qquad (4)$$

где A_k, B_k – коэффициенты ряда; l – число членов разложения; k - номер гармоники.

Применительно к 12 дискретным значениям Δ_i функции $F(\alpha)$, используем формулы

$$A_k = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{12} \Delta_i \cdot \cos k\alpha_i, \qquad B_k = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{12} \Delta_i \cdot \sin k\alpha_i. \qquad (5)$$

Формулу (4) можно написать иначе через амплитуды гармоник C_k и их фазы θ_k

$$F(\alpha)=\sum_{k=1}^{l}[C_k(\sin k\alpha+\theta_k)], \qquad (6)$$

где

$$C_k=\sqrt{A_k^2+B_k^2}, \qquad \operatorname{tg}\theta_k=\frac{A_k}{B_k}. \qquad (7)$$

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.

Преобразование погрешности измерения угла в погрешности направления. Функция $F(\alpha)$ является зависимостью погрешности измерения угла, которая зависит от погрешностей двух участков лимба, которые используются для измерения угла. Функция является промежуточной, потому что по ней нужно найти зависимость погрешности не угла, а направления. Обозначив функцию погрешности направления $f(\alpha)$, напишем для функции погрешности угла

$$F(\alpha)=f(\alpha+\varphi)-f(\alpha), \qquad (8)$$

где φ – величина угла при измерениях.

Исходная формула для решения задачи имеет вид:

$$f(\alpha)=\sum_{k=1}^{l}(a_k\cos k\alpha+b_k\sin k\alpha). \qquad (9)$$

Подставив (9) в (8), сделав громоздкие преобразования, решив систему уравнений, получим формулы для коэффициентов ряда $a_1, b_1, \ldots, b_4$:

$$a_k=-\frac{A_k}{2}-\frac{\sin k\varphi}{1-\cos k\varphi}\cdot\frac{B_k}{2}, \qquad b_k=\frac{\sin k\varphi}{1-\cos k\varphi}\cdot\frac{A_k}{2}-\frac{B_k}{2}. \qquad (10)$$

и для амплитуд $c_1,\ldots, c_4$

$$c_k=\frac{C_k}{2\cdot\sin\dfrac{k\varphi}{2}}, \qquad (11)$$

где $c_к$ – амплитуда погрешности направления.

Считая, что амплитуды C_k являются измеренными величинами, а амплиту-

ды c_k – вычисленными по (11), выведена формула Φ зависимости квадрата средней квадратической погрешности (СКП) функции $f(\alpha)$ от угла φ

$$\Phi = m_f^2 = \frac{m_c^2}{8}(\mathrm{cosec}^2\frac{\varphi}{2} + \mathrm{cosec}^2\varphi + \mathrm{cosec}^2\frac{3\varphi}{2} + \mathrm{cosec}^2 2\varphi), \qquad (12)$$

где m_C – СКП измерения амплитуд C_k.

Исследование на минимум функции (12) дало значение φ = 65,4°. Минимум довольно пологий и мало изменяется в диапазоне от 60° до 70°. Часть графика функции Φ при $m_C = 1$ представлен на рисунке 2.

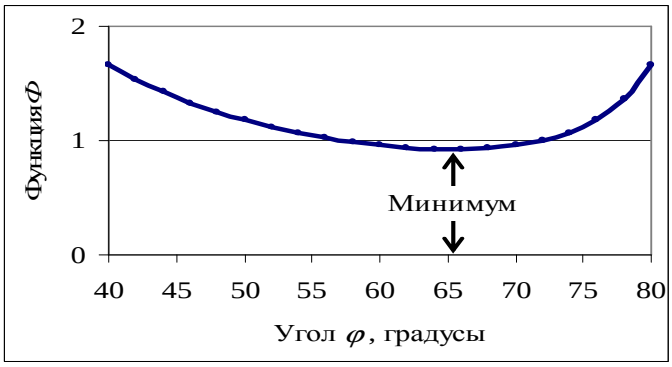

Рис. 2 - Пологий минимум функции Φ

Был также выполнен анализ влияния разных гармоник в среднем значении угла, полученном для разного числа полуприемов (приёмов) с одновременной перестановкой подставки на штативе. Его результаты приведены в таблице 1. Нулями отмечены исключаемые гармоники, решёткой - не исключаемые. Из таблицы видно, что можно не проводить исследование тахеометров на наличие погрешностей разных гармоник. Некоторые из них можно исключить соответствующей программой измерений. Так, например, при измерениях одним полным приемом (строка 2 таблицы 1) исключаются все нечетные гармоники. При измерении тремя полными приёмами с перестановкой подставки на штативе на 120° (строки 2 и 3) исключаются первые 5 гармоник.

Т а б л и ц а 1 Исключение гармоник при разном числе измерений

Число полуприемов	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	#

В третьем разделе «Выполнение экспериментальных измерений и их обработка» подробно изложены методы проведенных исследований. Поэтапно описывается технология выполнения исследований систематических погрешностей измерения горизонтальных углов и выявления упругих горизонтальных и вертикальных деформаций подставки при вращении алидады. Представлены особенности обработки измерений горизонтальных углов, скопированных с различных электронных тахеометров, в программе Microsoft Excel.

Подготовка и проведение эксперимента по выявлению погрешностей измерения горизонтальных углов тахеометрами. В работе приведены результаты исследования 16-ти электронных тахеометров различных марок и производителей (Leica, Nikon, Spectra Precision, Trimble, Stonex, Sokkia, Topcon, GeoMax) с разной СКП (1, 2, 3, 5, 6, 9") измерения горизонтального угла. Для каждого тахеометра выполнялось 16 циклов измерений в разные дни, по четыре цикла в один день. Исследования проводились на протяжении четырех лет (2010-2013).

Все измерения автоматически записывались в память тахеометра. При помощи соответствующего программного обеспечения результаты измерений передавались на компьютер и экспортировались в Microsoft Excel. Далее с помощью специально разработанных алгоритмов данные обрабатывались и представлялись в виде таблиц и графиков, где можно наглядно оценить итоги проведенного эксперимента. По результатам исследований были получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных. Подробно ознакомиться с алгоритмами разработанных программ для ЭВМ и баз данных можно в разделе 3.5 диссертации.

Подготовка и проведение эксперимента по выявлению упругих деформаций электронных тахеометров. При вращении алидады горизонтального круга тахеометра могут иметь место упругие деформации деталей неподвижной части прибора. Они проявляются в незначительных поворотах (колебаниях) подставки прибора вокруг горизонтальной и вертикальной осей вследствие воздействия переменного момента сил неуравновешенной алидады гори-

зонтального круга. Возможны и другие переменные напряжения в осевой системе прибора при вращении алидады. При наличии упругих деформаций положение горизонтального круга прибора при измерениях может быть нестабильным, что приведёт к погрешностям измерений углов.

Частично эти погрешности могут быть выявлены путем измерения одного и того же угла при разных установках подставки прибора на штативе. Выполненные исследования для 16-ти электронных тахеометров показали, что не менее чем у половины приборов имеет место заметная корреляция величины измеренного угла от положения подставки. Корреляция носит преимущественно гармонический характер. Колебания средних углов, вычисленных по 16 циклам, при разных положениях алидады у некоторых тахеометров со СКП измерения горизонтальных углов 5" достигали 15".

С целью выявления причин таких колебаний был разработан ещё один метод исследований тахеометра. Он предусматривает оценку влияния упругих деформаций подставки (рис. 3). В методе на исследуемом приборе 2 на неподвижной его части, выше подставки, но ниже алидады, закреплялось вертикально зеркало 3.

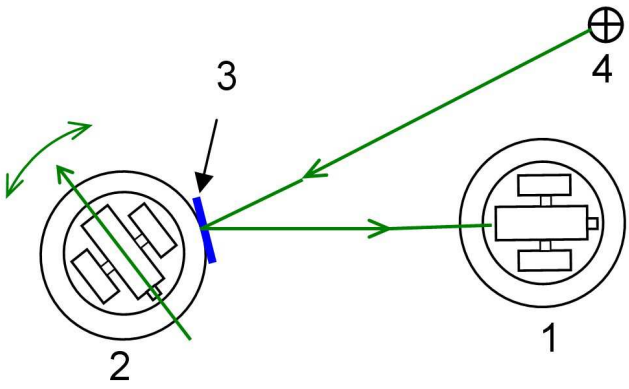

Рис. 3 - Схема размещения приборов

Измерения выполнялись другим тахеометром 1 на марку 4, закреплённую на стене и видимую через зеркало. Исследования выполнялись для 13 положений алидады исследуемого тахеометра через 30°. Вертикальной нитью зрительной трубы тахеометра 1 выполнялись наведения на марку 4 для каждого положения алидады тахеометра 2 и записывались в память прибора отсчёты по горизонтальному кругу. Если азимутальных деформаций неподвижной части прибора при вращении алидады нет, то все отсчёты должны быть одинаковые. Между тем, у некоторых приборов заметен разброс отсчётов при вращении алидады, носящий гармонический характер. Исследования были выполнены для 6 тахеометров из тех 16, которые

были исследованы на предмет наличия систематических погрешностей измерения горизонтальных углов. Для трех приборов заметны отклонения отсчётов от среднего значения. На рис. 4 представлены результаты исследования упругих горизонтальных деформаций при вращении алидады тахеометра.

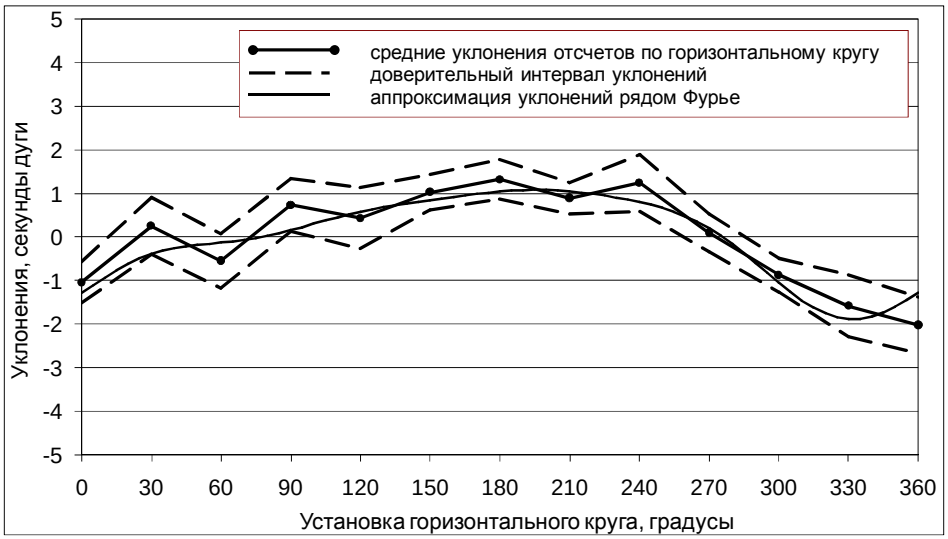

Рис. 4 - График уклонений и доверительный интервал (Nikon NPL332(5″))

Отдельно проводились исследования деформаций вокруг горизонтальной оси (вертикальные деформации). При исследованиях отсчитывался только вертикальный круг. На рис. 5 приведены результаты данного исследования.

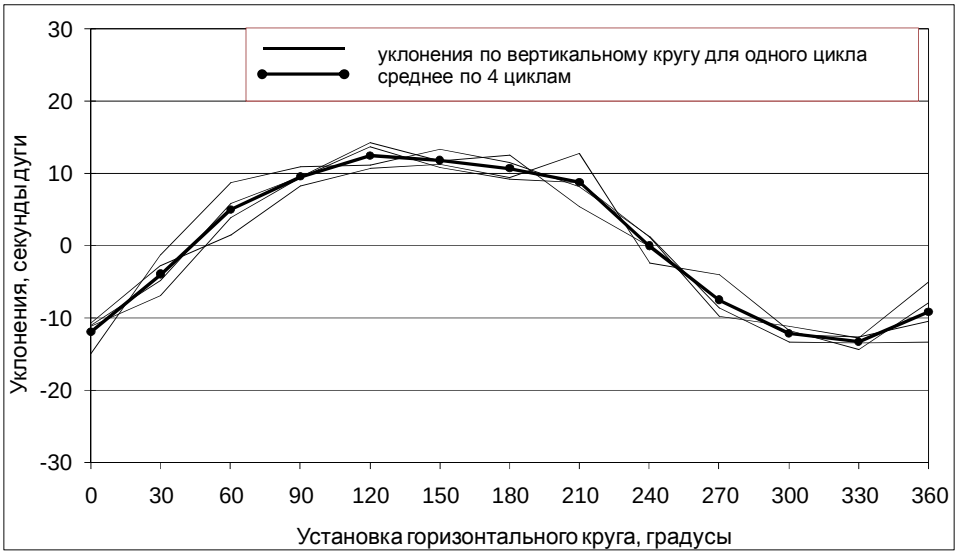

Рис. 5 - Графики отклонений от среднего (Nikon NPL332)

Исследования с помощью закреплённого на неподвижной части тахеометра зеркала показали, что у некоторых тахеометров имеют место азимутальные деформации при вращении алидады, достигающие 4-5″. А вертикальные деформации на порядок больше азимутальных и достигают 45″.

В четвертом разделе «Анализ выполненных исследований» представлен процесс обработки измерений и анализируются полученные результаты. Приводится сравнительный анализ обработанных данных между приборами разных производителей и с разной угловой точностью измерений. Дается экономический анализ целесообразности проведенных исследований. Обосновывается практическая значимость разработанных методов исследования.

При обработке измерений вычисляют измеренные углы между коллиматорами, средние углы в циклах и отклонения Δ от средних значений. В таблице 2 приведен пример предварительной обработки измерений для Nikon NPL332.

Т а б л и ц а 2 - Уклонения углов от средних по 4 циклам измерений (Nikon NPL332)

Отсчёты, градусы, доли		Среднее Δ по 16-ти	Привед. среднее	СКО × коэф. Стьюдента	Полоса погрешностей	
Левый коллиматор	Правый коллиматор				миним.	макс.
1	2	3	4	5	6	7
0	71,40	-0,79	-0,33	0,85	-1,64	0,06
30	101,40	2,83	2,79	0,64	2,20	3,47
60	131,40	3,83	3,79	0,91	2,93	4,74
90	161,40	-0,29	-0,33	0,77	-1,06	0,48
120	191,40	-2,67	-2,71	0,69	-3,35	-1,98
150	221,40	-0,10	-0,15	0,58	-0,68	0,47
180	251,40	0,33	0,29	0,71	-0,38	1,05
210	281,40	-1,04	-1,08	0,67	-1,72	-0,37
240	311,40	0,40	0,35	0,74	-0,34	1,14
270	341,40	-0,73	-0,77	0,56	-1,29	-0,16
300	11,40	-1,98	-2,02	0,57	-2,55	-1,41
330	41,40	0,21	0,17	0,60	-0,39	0,81
360	71,40	0,21	-	0,73	-0,52	0,94
Ср.угол	71,4					

Расчеты выполнены по полученным 192 отклонениям (в дуговых секундах) от средних, полученных по 16-ти циклам измерений. 13 средних отклонений, по 16-ти циклам каждое, приведены в графе 3. Затем они преобразованы так, чтобы число их было 12, и сумма равнялась 0 (графа 4). По этим данным Δ_i выполняется дальнейшая обработка. Оценка точности выполнена по внутренней сходимости. СКП M_Δ значения Δ_i равна:

$$M_\Delta = \sqrt{\frac{[(v)^2]}{n \cdot (n-1)}}, \qquad (13)$$

где v – уклонения значений Δ от среднего Δ_i для данной установки из 16 циклов; n=16. Границы полосы погрешностей (графы 6, 7) найдены по известным

формулам доверительного интервала

$$\Delta_{min} = \Delta_i - t_\beta \cdot M_\Delta, \qquad \Delta_{max} = \Delta_i + t_\beta \cdot M_\Delta, \tag{14}$$

где t_β - коэффициент Стьюдента; в данной работе принято $t_\beta = 1{,}8$,

что соответствует вероятности β=0,9 и числу степеней свободы 14.

В таблице 3 приведен пример разложения в ряд Фурье средних (приведенных) отклонений Δ из 16 циклов (графа 9). По ним по формулам (5) найдены 8 коэффициентов A_k и B_k (графы 2-4 ниже подписи "по формулам"). 4 коэффициента C_k вычислены по (7). Затем по (6) найдены дискретные значения функции $F(\alpha)$ (графа 5) для 12 установок α (графа 8).

Таблица 3 - Разложение погрешностей углов и направлений в ряды Фурье для Nikon NPL332

Погрешности углов, сек							Отсч. на лев.колл. градусы,.	Приведенное среднее	Погрешности направлений
Номер гармоники, k	Коэффициенты ряда Фурье			Знач. по ряду Фурье		Разности, (9)-(6)			
	при cos, A_k	при sin, B_k	амплит. Ck	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	-0,33	-1,461
0	0,000			2,385	2,385	0,407	30	2,79	-0,808
1	0,844	0,767	1,14	4,055	4,055	-0,263	60	3,79	-1,505
2	0,370	1,525	1,57	-0,410	-0,410	0,077	90	-0,33	0,244
3	-0,792	0,521	0,95	-2,810	-2,810	0,102	120	-2,71	2,840
4	-0,287	-1,037	1,08	0,080	0,080	-0,225	150	-0,15	0,834
				0,031	0,031	0,261	180	0,29	-0,502
	Подбором			-0,885	-0,885	-0,198	210	-1,08	0,920
0	0,000			0,299	0,299	0,055	240	0,35	0,049
1	0,844	0,767	1,14	-0,902	-0,902	0,131	270	-0,77	-0,441
2	0,370	1,525	1,57	-1,711	-1,711	-0,310	300	-2,02	0,579
3	-0,792	0,521	0,95	-0,267	-0,267	0,434	330	0,17	-0,748
4	-0,287	-1,037	1,08	Сумма квадратов		0,933			

Для контроля коэффициенты найдены совсем иначе по методу наименьших квадратов поисковым способом. По подбираемым коэффициентам (графы 4, 5 ниже подписи "Подбором"), вычисляются значения $F(\alpha)$ (графа 6), затем уклонения (графа 7) $v = \Delta - F(\alpha)$ (разности граф 9 и 6), затем сумма квадратов уклонений (в таблице $[v^2] = 0{,}933$). ЭВМ по специальной программе подбирает коэффициенты, непрерывно и последовательно их изменяя, до тех пор,

пока сумма квадратов $[v^2]$ не станет минимальной. Найденные коэффициенты двумя способами всегда совпадали, что свидетельствует о правильности разработанного метода обработки измерений. Аналогично вычислялись коэффициенты a_k, b_k и c_k для направлений (графа 10 табл. 3). По формулам (10) и (11) проводился контроль коэффициентов для углов и направлений.

По результатам обработки измерений построены графики. На рисунке 6 показаны 208 отклонения для упомянутого в таблице 2 тахеометра.

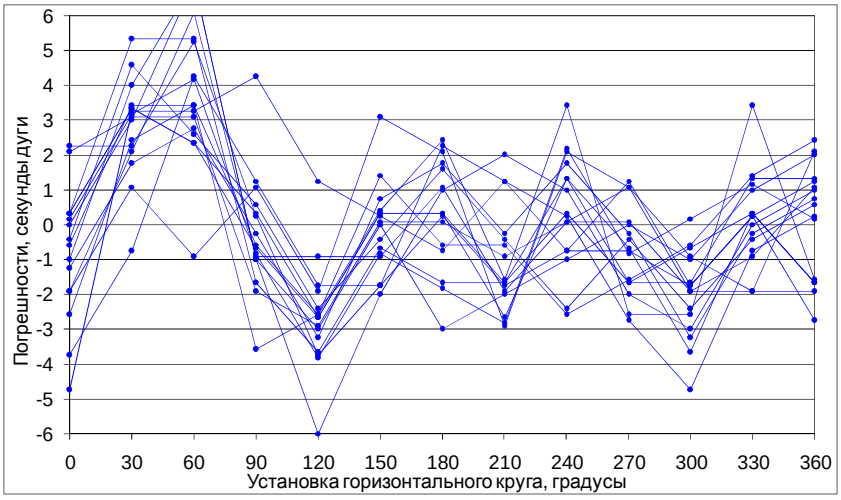

Рис. 6 - Графики погрешностей измерения горизонтального угла (Nikon NPL332)

Доверительный интервал (рис. 7) построен по данным, приведенным в графах 6 и 7 (таблица 2). Для этого тахеометра в доверительный интервал попадает половина значений. Это свидетельствует о том, что всего для 5-6 установок из 13 в доверительный интервал попадают нули.

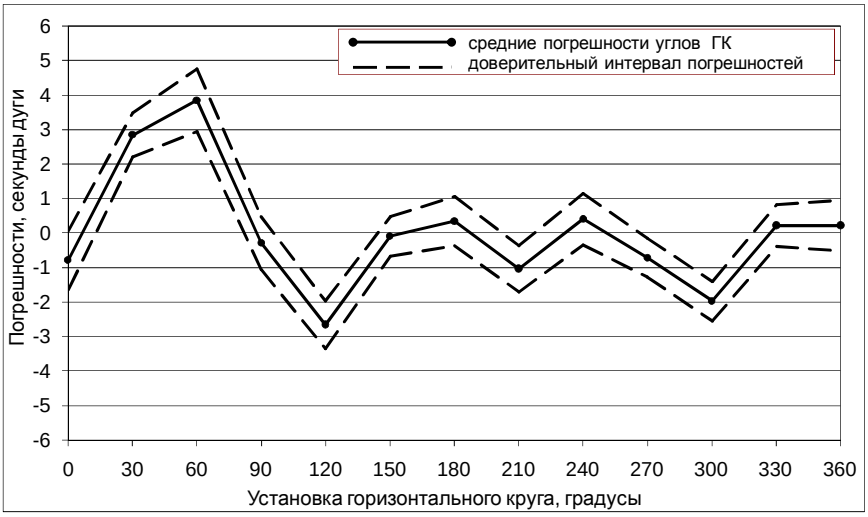

Рис. 7 - Доверительный интервал погрешностей измерения угла (Nikon NPL332)

Три кривые (рис. 8) построены по данным таблицы 3. Ломаной линией показаны средние отклонения по 16 приемам измерений (графа 9). Тонкой и двойной линиями показана аппроксимация рядами Фурье погрешностей углов (графа 6) и направлений (графа 10) соответственно.

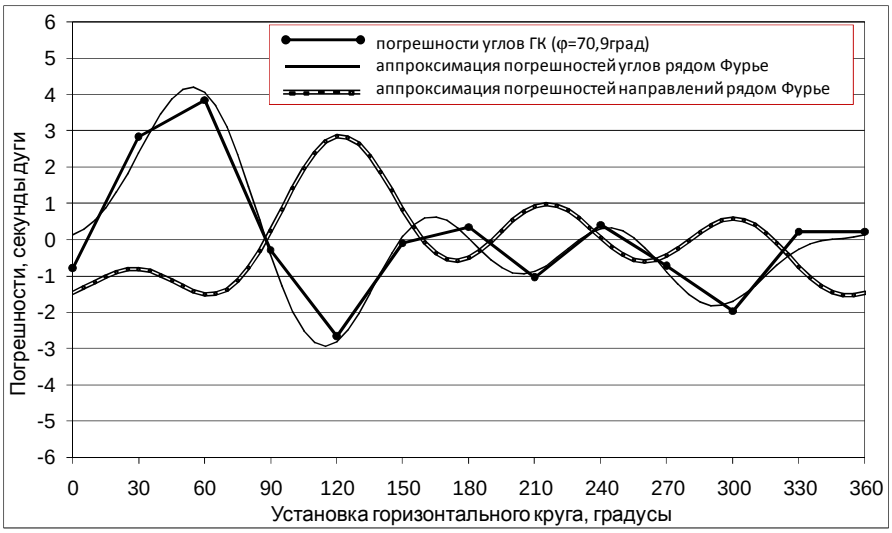

Рис. 8 - Графики погрешностей угла и направления Nikon NPL332

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 СКП. В таблице 4 показана часть полной таблицы для 16 тахеометров. Анализ результатов исследований показывает, что у 7 из 16 тахеометров имеют место заметные систематические погрешности в отсчётах по горизонтальному кругу.

Т а б л и ц а 4 - Результаты исследований угломерных погрешностей горизонтального круга

№ п/п	Тип тахеометра, угловая точность	Число приемов измерений	СКП* коэф. Стьюдента (1,8), секунды дуги	Амплитуды погрешностей горизонтального угла для номера гармоники, секунды дуги					Амплитуды погрешностей отсчета по горизонтальному кругу для гармоники, секунды дуги				
				1	2	3	4	Суммарная погрешность	1	2	3	4	Суммарная погрешность
1	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
2	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
3	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
	...												
15	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
16	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

На рисунке 9 приведен график погрешностей прибора, имеющего максимальную амплитуду погрешностей измерения угла.

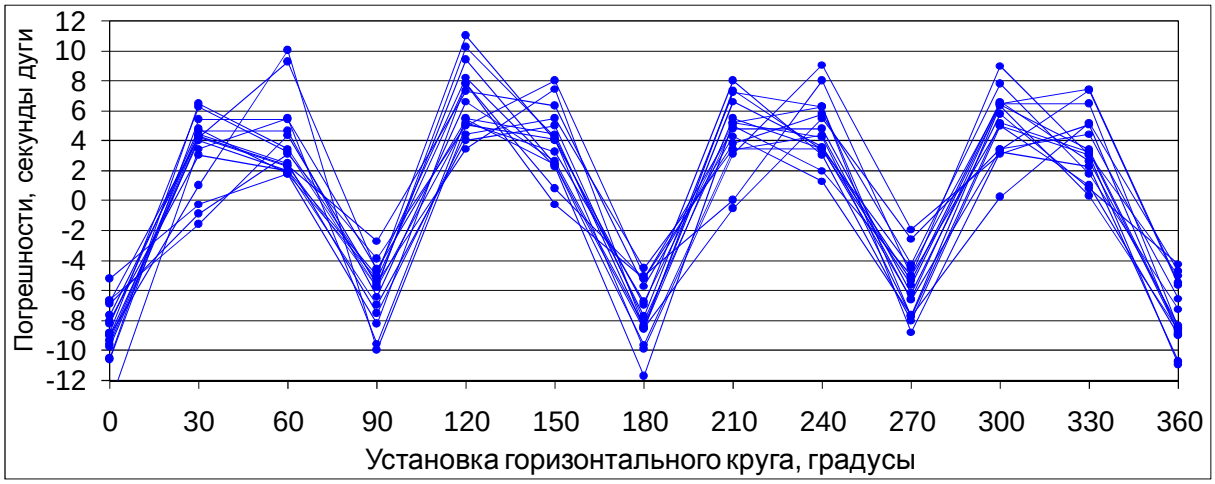

Рис. 9 - Графики погрешностей измерения угла (Тахеометр X(5″))

Выполнение контрольных измерений по разработанному методу на стационарном коллиматоре. Для подтверждения данных результатов измерений по предлагаемому методу были проведены аналогичные эксперименты на двух заводских коллиматорах The geodesic instrument inspections calibration desk «Model ppf550-3» (рис. 10). Коллиматоры имеют трубы длиной 60 см каждая и были расположены под нужным углом в 70˚. Для исследования использован тахеометр Nikon NPL 332. Для убедительности полученных результатов и выводов были выполнены измерения тем же тахеометром на коллиматоры и одновременно измерен точным теодолитом THEO-010 угол между коллиматорами 12-ю приёмами.

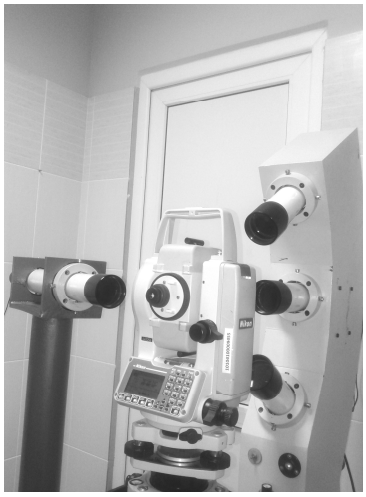

Рис. 10 - Коллиматоры

В таблице 5 в графах 2 и 3 приведены измерения тахеометром в 2013 году на 2 стационарных коллиматора. В графах 5 и 6 приведены поправки (погрешности с обратным знаком) измерений по 16 циклам, выполненным более 2 лет назад на 2 теодолита 4Т30П и их СКП. В графе 7 вычислены исправленные поправками углы. В графе 8 вычислены разности исправленных углов и эталонного угла, измеренного теодолитом THEO-010. В графе 9 приведены СКП уклонений как сумма (через сумму квадратов) трёх компонент: СКП по графам 4 и 6 и СКП эталонного угла (±0,41″).

Т а б л и ц а 5 – Результаты измерений 30.09.2010 и 05.01.2013

Установка, градус	Средний угол гр,доли	Средний угол, сек	СКП среднего, сек	Поправка сек, от 30.09.10	СКП поправки, сек	Исправ угол, сек	Уклон.от эталон, сек	СКП уклон, сек.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	89,7478	52,00	1,58	-1,70	0,47	50,30	**0,20**	**1,70**
30	89,7481	53,00	0,91	-3,65	0,35	49,35	**-0,75**	**1,06**
60	89,7476	51,25	0,48	-2,34	0,50	48,91	**-1,19**	**0,81**
90	89,7471	49,50	0,65	0,75	0,43	50,25	**0,15**	**0,88**
120	89,7467	48,00	0,71	1,92	0,38	49,92	**-0,18**	**0,90**
150	89,7471	49,50	0,96	0,78	0,32	50,28	**0,18**	**1,09**
180	89,7469	49,00	0,41	-0,06	0,40	48,94	**-1,16**	**0,70**
210	89,7467	48,25	0,75	0,34	0,37	48,59	**-1,51**	**0,93**
240	89,7472	49,75	0,95	0,80	0,41	50,55	**0,45**	**1,11**
270	89,7471	49,50	0,87	1,02	0,31	50,52	**0,42**	**1,01**
300	89,7469	48,75	1,55	1,39	0,32	50,14	**0,04**	**1,63**
330	89,7465	47,50	0,96	0,76	0,33	48,26	**-1,84**	**1,09**
360	89,7478	52,25	0,48	-1,71	0,40	50,54	**0,44**	**0,75**
СКП		1,73				0,81	0,86	
Коэффициент корреляции между графами 3 и 5 равен -0.886								

Убедительным является коэффициент корреляции между измеренными углами на 2 стационарных коллиматора в 2013 г (графа 3) и поправками, полученными (графа 5) по предлагаемому методу на 2 теодолита в 2010 г. Он составляет минус 0,886 (теоретически минус 1). Уменьшение в 2 раза СКП углов с поправками (0,86″ или 0,81″) по сравнению с СКП углов без поправок (1,73″) также свидетельствует о правильности выполненных экспериментов. Любопытна также хорошая сходимость СКП, вычисленных по формуле Бесселя (0,81″) и формуле Гаусса (0,87″) по истинным погрешностям.

На рисунке 11 приведены графики погрешностей направлений по горизонтальному кругу, полученные в разное время. Кривая 1 получена по 16 приемам, выполненным с 07.07 по 30.09.2010 на 2 теодолита 4Т30П, угол между которыми равен 70°. Кривая 2 получена по 4 приемам, выполненным 19.10.2012 на 2 коллиматора в лаборатории ООО «НАВГЕОКОМ-Юг». Угол между коллиматорами 70°. Кривая 3 получена по 4 приемам, выполненным 05.01.2013 на 2 коллиматора, угол между которыми равен 90°.

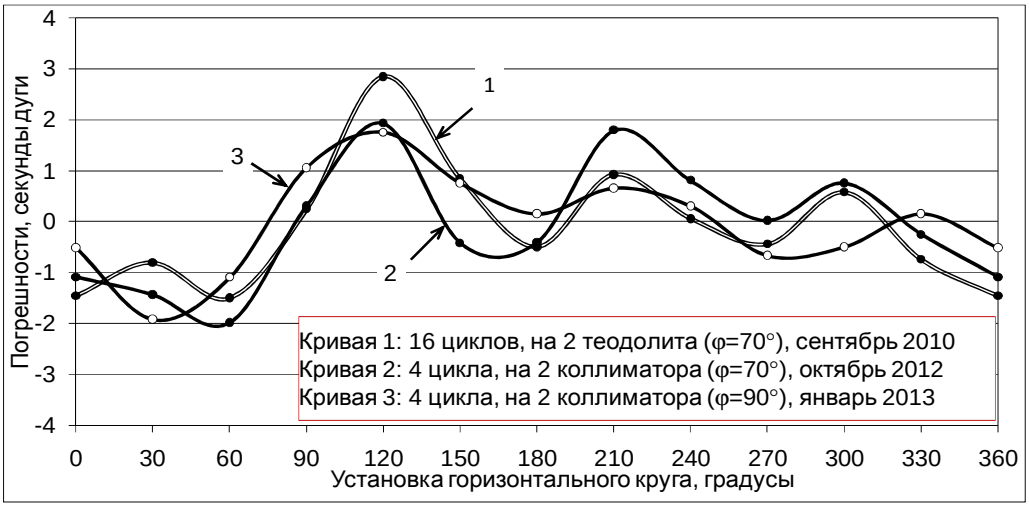

Рис. 11– Результаты измерений погрешностей направлений тахеометром

Как видно из рисунка, три графика хорошо согласуются между собой, что ещё раз свидетельствует о достоверности предлагаемых методов исследований тахеометров.

Таким образом, сравнение между собой трёх разных программ измерений горизонтальных углов на коллиматорах одним тахеометром в течение 2 лет показал, что выявленные погрешности являются систематическими (повторяемыми) и что введение поправок предлагаемым способом может повысить точность измерений горизонтальных углов до двух раз.

В пятом разделе «Исследования упругих деформаций электронных тахеометров» приводятся результаты дополнительного эксперимента по выявлению влияния упругих деформаций деталей тахеометра на погрешность измерения горизонтальных углов электронными тахеометрами. Для проведения измерений использовалось специальное устройство, подобное описанному выше, но с двумя оптическими зеркалами, расположенными вертикально под углом 90° друг к другу, закрепленными на неподвижной части электронного тахеометра ниже алидады, но выше подставки. При вращении алидады горизонтального круга исследуемого тахеометра устройство должно быть неподвижным, если нет упругих деформаций. При их наличии устройство с зеркалами может испытывать повороты вокруг вертикальной оси (азимутальные повороты), которые можно зафиксировать другими тахеометрами (измерительными). Эти повороты приводят к погрешностям при измерении горизонтальных углов.

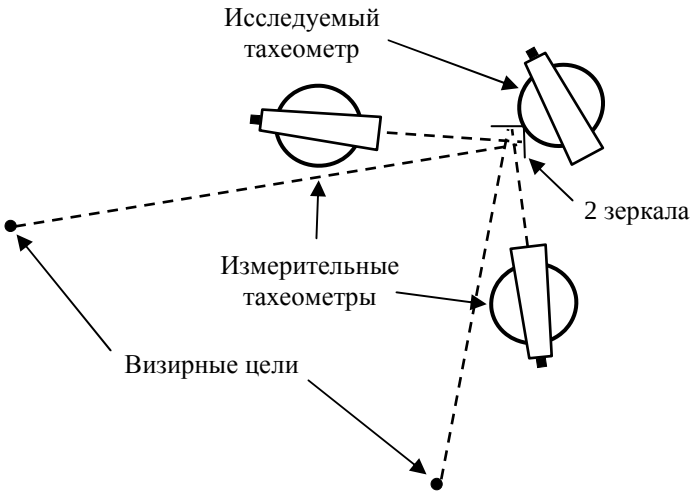

Рис. 12 - Схема размещения приборов

Возможные повороты зеркал фиксируются двумя тахеометрами, в зрительные трубы которых видны через зеркала визирные цели, закреплённые на стене помещения (рис. 12). Делают наведения тахеометрами на визирные цели при разных положениях алидады исследуемого тахеометра, снимают отсчёты, вычисляют уклонения отсчётов от среднего, которые и будут являться функциями погрешностей, вызванных упругими деформациями. Чтобы учесть влияние деформаций штатива на точность измерений горизонтальных углов, проводилась еще одна серия измерений, в которой устройство с зеркалами закреплялось между подставкой и головкой штатива (зеркало на штативе). Так как ожидаемые азимутальные деформации соизмеримы или даже меньше возможных погрешностей работы приборов, был разработан метод, повышающий точность определения деформаций более чем в 2 раза. Для этого применены 2 способа.

В первом способе нужно так разместить измерительный тахеометр и визирую цель относительно зеркала, чтобы изменение отсчёта по горизонтальному или вертикальному кругу при небольшом повороте $\Delta\alpha$ зеркала вокруг соответственно вертикальной или горизонтальной (совпадающей с плоскостью зеркала) осей, был максимальным.

Во втором способе принудительно увеличивают штатный момент силы в несколько раз. Для этого измеряют момент силы, вызванный внецентренностью алидады в штатном режиме работы прибора, и дополнительно закрепляют в нужном месте алидады груз, повышающий в несколько раз штатный момент силы. Оба вектора моментов должны совпадать по направлению.

Заключение

Автор диссертации выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, доценту Желтко Чеславу Николаевичу за оказанную помощь при работе над диссертацией.

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

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

2. Разработан метод исследования азимутальных деформаций и деформаций в вертикальной плоскости подставки электронного тахеометра при вращении алидады.

3. С целью апробации разработанных 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″).

4. 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.

Разработанные 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 работ, опубликованных по теме диссертации:

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

2. Гура Д.А., Аветисян Г.Г., Желтко Ч.Н. Исследования упругих деформаций электронных тахеометров // Геодезия и картография. - 2011. - № 5. – С. 10-12.

3. 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.

4. Гура Д.А., Желтко Ч.Н., Шевченко Г.Г., Пастухов М.А. История проблемы исследования угломерных ошибок углоизмерительных приборов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2013. - №5. – С. 43-45.

5. Gura D.A., Zheltko Ch.N., Shevchenko G.G., Berdzenishvili S.G. Experimental investigations of the errors of measurements of horizontal angles by means of electronic tacheometers // MEASUREMENT TECHNIQUES Издательство: Springer New York Consultants Bureau, 2014, том 57 №3, P. 277-279.

6. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Пастухов М.А., Шевченко Г.Г. Исследования влияния внецентренности алидады электронных тахеометров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2015. - №6. – С. 18-23.