



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИГДиТ
С.Е. Гавришев

25.02.2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)
ТЕОРИЯ ОШИБОК И УРАВНИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ**

Направление подготовки (специальность)
21.05.04 ГОРНОЕ ДЕЛО

Направленность (профиль/специализация) программы
21.05.04 специализация N 4 "Маркшейдерское дело"

Уровень высшего образования - специалитет

Форма обучения
заочная

| | |
|---------------------|---|
| Институт/ факультет | Институт горного дела и транспорта |
| Кафедра | Геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых |
| Курс | 5 |

Магнитогорск
2019 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по специальности 21.05.04
ГОРНОЕ ДЕЛО (приказ Минобрнауки России от 17.10.2016 г. № 1298)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Геологии,
маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых

23.01.2020, протокол № 5

Зав. кафедрой  И.А. Гришин

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИГДиТ
25.02.2020 г. протокол № 7

Председатель  С.Е. Гавришев

Рабочая программа составлена:
ассистент кафедры ГМДиОПИ,

 К.С. Наумова

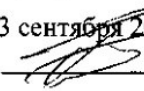
Рецензент:
директор ООО «Магнитогорская маркшейдерско-геодезическая компания»,

 А.А. Шекунова



Лист актуализации рабочей программы

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2020 - 2021 учебном году на заседании кафедры Геологии, маркшейдерского дела и обогащения

Протокол от 03 сентября 2020 г. № 1
Зав. кафедрой  И.А. Гришин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2021 - 2022 учебном году на заседании кафедры Геологии, маркшейдерского дела и обогащения

Протокол от _____ 20__ г. № __
Зав. кафедрой _____ И.А. Гришин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2022 - 2023 учебном году на заседании кафедры Геологии, маркшейдерского дела и обогащения

Протокол от _____ 20__ г. № __
Зав. кафедрой _____ И.А. Гришин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2023 - 2024 учебном году на заседании кафедры Геологии, маркшейдерского дела и обогащения

Протокол от _____ 20__ г. № __
Зав. кафедрой _____ И.А. Гришин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2024 - 2025 учебном году на заседании кафедры Геологии, маркшейдерского дела и обогащения

Протокол от _____ 20__ г. № __
Зав. кафедрой _____ И.А. Гришин

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2025 - 2026 учебном году на заседании кафедры Геологии, маркшейдерского дела и обогащения

Протокол от _____ 20__ г. № __
Зав. кафедрой _____ И.А. Гришин

1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Для горного инженера-маркшейдера математическая обработка маркшейдерско-геодезической и горно-геологической информации является важнейшей из дисциплин. Правильно обработанные маркшейдерские измерения – одна из предпосылок рациональной и безопасной разработки месторождения.

Целью преподавания дисциплины является формирование у студентов прочных знаний о характере и особенностях обработки различных видов маркшейдерско-геодезической информации, привития навыков выполнения необходимых вычислений.

2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Теория ошибок и уравнивательные вычисления входит в базовую часть учебного плана образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Математика

Геодезия

Геодезия и маркшейдерия

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Дистанционные методы зондирования Земли

Обоснование проектных решений

Технология производства работ

Анализ и оценка результатов

Маркшейдерские работы при строительстве подземных сооружений

Маркшейдерское обеспечение горных работ и строительства гидротехнических сооружений

Маркшейдерское обеспечение безопасности ведения горных работ

Подготовка к сдаче и сдача государственного экзамена

3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения

В результате освоения дисциплины (модуля) «Теория ошибок и уравнивательные вычисления» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения |
|---|--|
| ПК-7 умением определять пространственно-геометрическое положение объектов, осуществлять необходимые геодезические и маркшейдерские измерения, обрабатывать и интерпретировать их результаты | |
| Знать | условия применения и математической обработки результатов измерений в запроектированной сети, виды геодезических построений, создаваемых, на местности; задачи, условия (причины) и методы уравнивания геодезических построений; строгие и нестрогие методы уравнивания, условия выбора метода уравнивания |

| | |
|---|--|
| Уметь | применять конкретный тип геодезического построения; определять метод уравнивания для отдельных видов геодезической основы; уравнивать геодезические сети, выполнять предрасчёт точности измерений и оценку точности результатов измерений, определять назначение, вид геодезической сети |
| Владеть | методами создания геодезической основы для конкретного вида предприятия; методикой уравнивания создаваемого геодезического обоснования; знанием программных продуктов, повышающих производительность труда уравнивательных вычислений |
| ПК-14 готовностью участвовать в исследованиях объектов профессиональной деятельности и их структурных элементов | |
| Знать | принципы исследования, причины и условия уравнивания геодезических построений, методы уравнивательных вычислений; условия применения метода уравнивания |
| Уметь | выбирать метод уравнивания для конкретного вида геодезической сети, выполнять анализ выбранного метода уравнивания, применять выбранный метод уравнивания |
| Владеть | приёмами математической обработки результатов измерений, знанием методов уравнивания, грамотно применять методы уравнивания геодезических сетей |
| ПСК-4.1 готовностью осуществлять производство маркшейдерско-геодезических работ, определять пространственно-временные характеристики состояния земной поверхности и недр, горно-технических систем, подземных и наземных сооружений и отображать информацию в соответствии с современными нормативными требованиями | |
| Знать | методики обработки результатов равноточных и неравноточных геодезических измерений |
| Уметь | выбирать методики оценки точности результатов измерений и их функций |
| Владеть | программными продуктами для автоматизации математической обработки результатов измерений |
| ПСК-4.3 способностью составлять проекты маркшейдерских и геодезических работ | |
| Знать | основные нормативные документы и научно-техническую документацию, их структуру; основные структуру и содержание, правила оформления, положения инструкций по работе с результатами полевых измерений |
| Уметь | пользоваться нормативной и научно-технической документацией, применять её для грамотного решения задач уравнивания |
| Владеть | основными приемами работы с нормативной, научно-технической и охранной документацией |

4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц 108 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 8,7 акад. часов;
- аудиторная – 8 акад. часов;
- внеаудиторная – 0,7 акад. часов
- самостоятельная работа – 95,4 акад. часов;
- контроль – 3,9 акад. часов.

Форма аттестации - зачет с оценкой

| Раздел/ тема дисциплины | Курс | Аудиторная контактная работа (в акад. часах) | | | Самостоятельная работа студента | Вид самостоятельной работы | Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации | Код компетенции |
|--|------|--|-----------|-------------|---------------------------------|---|---|-------------------------------|
| | | Лек. | лаб. зан. | практ. зан. | | | | |
| 1. Элементы теории погрешностей (ошибок) геодезических измерений | | | | | | | | |
| 1.1 Общие сведения об измерениях | 5 | 0,16 | | | 2 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Устный опрос (собеседование) | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 1.2 Погрешности результатов измерений | | 0,16 | | | 2 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Устный опрос (собеседование) | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 1.3 Задачи теории погрешностей измерений | | 0,16 | | | 2 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Устный опрос (собеседование) | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| Итого по разделу | | 0,48 | | | 6 | | | |
| 2. Равноточные измерения | | | | | | | | |
| 2.1 Вычисление наиболее точного по вероятности значения результата измерений одной и той же величины | 5 | 0,16 | | | 2 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Устный опрос (собеседование) | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| Итого по разделу | | 0,16 | | | 2 | | | |

| | | | | | | | | |
|--|---|------|--|------|------|---|--|-------------------------------|
| 3. Оценка точности результатов ряда | | | | | | | | |
| 3.1 Средняя квадратическая погрешность результата отдельного измерения. Предельная и относительная погрешности | 5 | 0,16 | | 0,19 | 3 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практической работы и решение задач | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 3.2 Вероятнейшие погрешности | | 0,16 | | 0,19 | 3 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практической работы и решение задач | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| Итого по разделу | | 0,32 | | 0,38 | 6 | | | |
| 4. Оценка точности функций | | | | | | | | |
| 4.1 Средняя квадратическая погрешность функции общего вида | 5 | 0,16 | | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практической работы и решение задач | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 4.2 Средняя квадратическая погрешность простой арифметической середины | | 0,16 | | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практической работы и решение задач | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 4.3 Оценка точности результатов измерений угловых в триангуляции | | 0,16 | | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практической работы и решение задач | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 4.4 Оценка точности результатов ряда двойных равноточных измерений | | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практической работы и решение задач | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| Итого по разделу | | 0,64 | | 0,76 | 16,5 | | | |
| 5. Неравноточные измерения | | | | | | | | |
| 5.1 Общая арифметическая середина. Веса результатов измерений | 5 | 0,16 | | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|------|------|------|---|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 5.2 | Средняя квадратическая погрешность единицы веса | 0,16 | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |
| 5.3 | Средняя квадратическая погрешность и вес общей арифметической середины | 0,16 | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |
| 5.4 | Вычисление средней квадратической погрешности единицы веса | 0,16 | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |
| 5.5 | Вычисление весов функций независимых аргументов | 0,16 | 0,19 | 4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |
| Итого по разделу | | 0,8 | 0,95 | 20 | | | | |
| 6. Основы метода наименьших квадратов | | | | | | | | |
| 6.1 | Задача совместного уравнивания нескольких измеренных величин | 5 | 0,16 | 0,19 | 4,4 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 6.2 | Принцип (способ) наименьших квадратов | 0,16 | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |
| 6.3 | Коррелятный способ уравнивания | 0,16 | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |
| 6.4 | Параметрический способ уравнивания | 0,16 | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 | |

| | | | | | | | |
|---|------|--|------|------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 6.5 Вычисление коэффициентов нормальных уравнений | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 6.6 Контроль вычисления коэффициентов нормальных уравнений | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 6.7 Решение нормальных уравнений | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 6.8 Контроль решения нормальных уравнений | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 6.9 Схемы решения нормальных уравнений по алгоритму К.Ф. Гаусса | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| 6.10 Оценка точности измеренных величин и их функций при уравнивании коррелятным способом | 0,16 | | 0,19 | 4,5 | Изучение основной и дополнительной литературы по дисциплине, конспекта лекций | Выполнение практических работ | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |
| Итого по разделу | 1,6 | | 1,91 | 44,9 | | | |
| Итого по курсу | 4 | | 4 | 95,4 | | зао | |
| Итого по дисциплине | 4 | | 4 | 95,4 | | зачет с оценкой | ПСК-4.1, ПСК-4.3, ПК-7, ПК-14 |

5 Образовательные технологии

Для реализации предусмотренных видов учебной работы в качестве образовательных технологий в преподавании дисциплины «Теория ошибок и уравнительные вычисления» используются традиционная и модульно-компетентностная технологии.

Лекции проходят в традиционной форме. На лекции-консультации, излагается новый материал, сопровождающийся вопросами-ответами по теме лекции.

Практические работы выполняются студентами по вариантам.

Самостоятельная работа заключается в проработке отдельных вопросов при изучении дисциплины и при подготовке к сдаче зачета

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Представлено в приложении 1.

7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

Представлены в приложении 2.

8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Основная литература:

1. Гальянов А.В., Гордеев В.А. Развитие научных идей в горном деле: Маркшейдерия: научная монография. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2018. 559 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36292312>

2. Голубев В.В. Геодезия. Теория математической обработки геодезических измерений: Учеб. для вузов. – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2016. 422 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30089838>

3. Дьяков, Б.Н. Геодезия [Электронный ресурс]: учебник / Б.Н. Дьяков. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2019. — 416 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/111205>

б) Дополнительная литература:

1. Маркузе, Ю. И. Теория математической обработки геодезических измерений : учебное пособие / Ю. И. Маркузе, В. В. Голубев. — Москва : Академический Проект, 2020. — 247 с. — ISBN 978-5-8291-2981-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/132444>

2. Перфильев, А. А. Теория математической обработки геодезических измерений : учебное пособие / А. А. Перфильев. — Новосибирск : СГУВТ, 2019. — 80 с. — ISBN 978-5-8119-0810-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/147160>

3. Беликов, А. Б. Математическая обработка результатов геодезических измерений : учебное пособие / А. Б. Беликов, В. В. Симонян. — 2-е изд. — Москва : МИСИ – МГСУ, 2016. — 432 с. — ISBN 978-7264-1255-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/73707>

4. Инженерная геодезия и геоинформатика. Краткий курс : учебник / М. Я. Брынь, Е. С. Богомолова, В. А. Коугия, Б. А. Лёвин ; под редакцией В. А. Коугия. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-1831-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/64324>

в) Методические указания:

Представлено в приложении 3.

г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Программное обеспечение

| Наименование ПО | № договора | Срок действия лицензии |
|---|------------------------------|------------------------|
| MS Office 2007 Professional | № 135 от 17.09.2007 | бессрочно |
| 7Zip | свободно распространяемое ПО | бессрочно |
| MS Windows 7 Professional(для классов) | Д-1227-18 от 08.10.2018 | 11.10.2021 |
| MS Windows 7 Professional (для классов) | Д-757-17 от 27.06.2017 | 27.07.2018 |

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

| Название курса | Ссылка |
|--|--|
| Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) | URL: https://elibrary.ru/project_risc.asp |
| Поисковая система Академия Google (Google Scholar) | URL: https://scholar.google.ru/ |
| Информационная система - Единое окно доступа к информационным ресурсам | URL: http://window.edu.ru/ |

9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа-Технические средства обучения, служащие для представления учебной информации большой аудитории: мультимедийные средства хранения, передачи и представления учебной информации. Специализированная мебель

Учебная аудитория для проведения практических занятий-Технические средства обучения, служащие для представления учебной информации большой аудитории: мультимедийные средства хранения, передачи и представления учебной информации. Специализированная мебель

Учебная аудитория для групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации-Компьютерная техника с пакетом MS Office, с подключением к сети «Интернет» и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета. Специализированная мебель

Помещение для самостоятельной работы-Компьютерная техника с пакетом MS Office, с подключением к сети «Интернет» и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета. Специализированная мебель

Приложение 1

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Аудиторная самостоятельная работа студентов на практических занятиях осуществляется под контролем преподавателя в виде решения задач и выполнения упражнений, которые определяет преподаватель для студента.

Самостоятельная работа студентов осуществляется в виде чтения литературы по соответствующему разделу с проработкой материала и выполнения домашних заданий с консультациями преподавателя.

| Виды | Формы контроля |
|--|-------------------------|
| Выполнение практических работ | Проверка и защита работ |
| Поиск дополнительной информации по заданной теме (работа с библиографическими материалами, справочниками, каталогами, словарями, энциклопедиями) | Практические работы |

Примерный перечень теоретических вопросов к зачёту:

1. Задачи дисциплины «Теория ошибок и уравнительные вычисления»
2. Что понимают под измерением физической величины?
3. Какие измерения называют прямыми, косвенными, равноточными и неравноточными?
4. Что является результатом измерения?
5. Что понимается под ошибкой (погрешностью) результата измерения?
6. Какие ошибки называются грубыми, систематическими, случайными?
7. Как вычислить вероятнейшее значение измеряемой величины по результатам многократных равноточных измерений?
8. Средняя квадратическая ошибка результатов равноточных измерений: формулы Гаусса, Бесселя, Ферреро.
9. Средняя квадратическая ошибка функции измеренных величин.
10. Средняя квадратическая ошибка результатов двойных равноточных измерений.
11. Средняя квадратическая ошибка простой арифметической середины.
12. Общая арифметическая середина.
13. Средняя квадратическая ошибка единицы веса.
14. Средняя квадратическая ошибка и вес общей арифметической середины.
15. Что понимается под уравниванием результатов измерений?
16. Уравнивание и оценка точности направлений, измеренных на станции способом круговых приёмов.
17. Что является условием и причиной возникновения задачи уравнивания?
18. Принцип наименьших квадратов.
19. Коррелятивный способ уравнивания.
20. Параметрический способ уравнивания.
21. Как составляют условные уравнения?
22. Как составляют нормальные уравнения и вычисляются коэффициенты нормальных уравнений?
23. Алгоритм К. Ф. Гаусса решения систем нормальных уравнений?
24. Контроль решения нормальных уравнений.
25. Оценка точности измеренных величин и их функций при уравнивании коррелятным способом.

Приложение 2

7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:

Примерное содержание:

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|--|--|---|
| ПК-7 – умением определять пространственно-геометрическое положение объектов, осуществлять необходимые геодезические и маркшейдерские измерения, обрабатывать и интерпретировать их результаты | | |
| Знать | условия применения и математической обработки результатов измерений в запроектированной сети, виды геодезических построений, создаваемых, на местности; задачи, условия (причины) и методы уравнивания геодезических построений; строгие и нестрогие методы уравнивания, условия выбора метода уравнивания | <p>Примерный перечень теоретических вопросов к зачёту:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Задачи дисциплины «Математическая обработка результатов измерений» 2. Что понимают под измерением физической величины? 3. Какие измерения называют прямыми, косвенными, равноточными и неравноточными? 4. Что является результатом измерения? 5. Что понимается под ошибкой (погрешностью) результата измерения? 6. Какие ошибки называются грубыми, систематическими, случайными? 7. Как вычислить вероятнейшее значение измеряемой величины по результатам многократных равноточных измерений? 8. Средняя квадратическая ошибка результатов равноточных измерений: формулы Гаусса, Бесселя, Ферреро. 9. Средняя квадратическая ошибка функции измеренных величин. 10. Средняя квадратическая ошибка результатов двойных равноточных измерений. 11. Средняя квадратическая ошибка простой арифметической середины. 12. Общая арифметическая середина. 13. Средняя квадратическая ошибка единицы веса. 14. Средняя квадратическая ошибка и вес общей арифметической середины. 15. Что понимается под уравниванием результатов измерений? 16. Уравнивание и оценка точности направлений, измеренных на станции способом круговых приёмов. 17. Что является условием и причиной возникновения задачи уравнивания? 18. Принцип наименьших квадратов. |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|--|--|---|
| | | 19. Коррелятивный способ уравнивания. 20. Параметрический способ уравнивания. 21. Как составляют условные уравнения? 22. Как составляют нормальные уравнения и вычисляются коэффициенты нормальных уравнений? 23. Алгоритм К. Ф. Гаусса решения систем нормальных уравнений? 24. Контроль решения нормальных уравнений. 25. Оценка точности измеренных величин и их функций при уравнивании коррелятивным способом. |
| Уметь | применять конкретный тип геодезического построения; определять метод уравнивания для отдельных видов геодезической основы; уравнивать геодезические сети, выполнять предрасчёт точности измерений и оценку точности результатов измерений, определять назначение, вид геодезической сети | Примерный перечень практических заданий: <ol style="list-style-type: none"> 1. Уравнивание одиночного нивелирного хода III класса; 2. Уравнивание сети нивелирования III класса с одной узловой точкой; 3. Уравнивание полигонометрического хода произвольной формы коррелятивным способом. |
| Владеть | методами создания геодезической основы для конкретного вида предприятия; методикой уравнивания создаваемого геодезического обоснования; знанием программных продуктов, повышающих производительность труда уравнивательных вычислений | Решить задачу: Выполнить уравнивание одиночного нивелирного хода III класса. |
| ПК-14 готовностью участвовать в исследованиях объектов профессиональной деятельности и их структурных элементов | | |
| Знать | принципы исследования, причины и условия уравнивания геодезических построений, методы уравнивательных вычислений; условия применения метода | Примерный перечень теоретических вопросов к зачёту: <ol style="list-style-type: none"> 1. Задачи дисциплины «Математическая обработка результатов измерений» 2. Что понимают под измерением физической величины? 3. Какие измерения называют прямыми, косвенными, равноточными и |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|---------------------------------|---------------------------------|--|
| | уравнивания | <p>неравноточными?</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Что является результатом измерения? 5. Что понимается под ошибкой (погрешностью) результата измерения? 6. Какие ошибки называются грубыми, систематическими, случайными? 7. Как вычислить вероятнейшее значение измеряемой величины по результатам многократных равноточных измерений? 8. Средняя квадратическая ошибка результатов равноточных измерений: формулы Гаусса, Бесселя, Ферреро. 9. Средняя квадратическая ошибка функции измеренных величин. 10. Средняя квадратическая ошибка результатов двойных равноточных измерений. 11. Средняя квадратическая ошибка простой арифметической середины. 12. Общая арифметическая середина. 13. Средняя квадратическая ошибка единицы веса. 14. Средняя квадратическая ошибка и вес общей арифметической середины. 15. Что понимается под уравниванием результатов измерений? 16. Уравнивание и оценка точности направлений, измеренных на станции способом круговых приёмов. 17. Что является условием и причиной возникновения задачи уравнивания? 18. Принцип наименьших квадратов. 19. Коррелатный способ уравнивания. 20. Параметрический способ уравнивания. 21. Как составляют условные уравнения? 22. Как составляют нормальные уравнения и вычисляются коэффициенты нормальных уравнений? 23. Алгоритм К. Ф. Гаусса решения систем нормальных уравнений? 24. Контроль решения нормальных уравнений. 25. Оценка точности измеренных величин и их функций при уравнивании коррелатным способом. |
| Уметь | выбирать метод уравнивания для | <i>Примерный перечень практических заданий:</i> |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|---|---|---|
| | конкретного вида геодезической сети, выполнять анализ выбранного метода уравнивания, применять выбранный метод уравнивания | <ol style="list-style-type: none"> 1. Уравнивание одиночного нивелирного хода III класса; 2. Уравнивание сети нивелирования III класса с одной узловой точкой; 3. Уравнивание полигонометрического хода произвольной формы коррелантным способом. |
| Владеть | приёмами математической обработки результатов измерений, знанием методов уравнивания, грамотно применять методы уравнивания геодезических сетей | <p>Решить задачу: Выполнить уравнивание сети нивелирования III класса с одной узловой точкой.</p> |
| <p>ПСК-4.1 готовностью осуществлять производство маркшейдерско-геодезических работ, определять пространственно-временные характеристики состояния земной поверхности и недр, горно-технических систем, подземных и наземных сооружений и отображать информацию в соответствии с современными нормативными требованиями</p> | | |
| Знать | методики обработки результатов равноточных и неравноточных геодезических измерений | <p>Примерный перечень теоретических вопросов к зачёту:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Задачи дисциплины «Математическая обработка результатов измерений» 2. Что понимают под измерением физической величины? 3. Какие измерения называют прямыми, косвенными, равноточными и неравноточными? 4. Что является результатом измерения? 5. Что понимается под ошибкой (погрешностью) результата измерения? 6. Какие ошибки называются грубыми, систематическими, случайными? 7. Как вычислить вероятнейшее значение измеряемой величины по результатам многократных равноточных измерений? 8. Средняя квадратическая ошибка результатов равноточных измерений: формулы Гаусса, Бесселя, Ферреро. 9. Средняя квадратическая ошибка функции измеренных величин. 10. Средняя квадратическая ошибка результатов двойных равноточных измерений. 11. Средняя квадратическая ошибка простой арифметической середины. 12. Общая арифметическая середина. 13. Средняя квадратическая ошибка единицы веса. 14. Средняя квадратическая ошибка и вес общей арифметической середины. 15. Что понимается под уравниванием результатов измерений? |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|---|--|---|
| | | 16. Уравнивание и оценка точности направлений, измеренных на станции способом круговых приёмов. 17. Что является условием и причиной возникновения задачи уравнивания? 18. Принцип наименьших квадратов. 19. Коррелятивный способ уравнивания. 20. Параметрический способ уравнивания. 21. Как составляют условные уравнения? 22. Как составляют нормальные уравнения и вычисляются коэффициенты нормальных уравнений? 23. Алгоритм К. Ф. Гаусса решения систем нормальных уравнений? 24. Контроль решения нормальных уравнений. 25. Оценка точности измеренных величин и их функций при уравнивании коррелятивным способом. |
| Уметь | выбирать методики оценки точности результатов измерений и их функций | Примерный перечень практических заданий: 1. Уравнивание одиночного нивелирного хода III класса; 2. Уравнивание сети нивелирования III класса с одной узловой точкой; 3. Уравнивание полигонометрического хода произвольной формы коррелятивным способом. |
| Владеть | программными продуктами для автоматизации математической обработки результатов измерений | Решить задачу: Выполнить уравнивание полигонометрического хода произвольной формы коррелятивным способом. |
| ПСК-4.3 способностью составлять проекты маркшейдерских и геодезических работ | | |
| Знать | основные нормативные документы и научно-техническую документацию, их структуру; основные структуру и содержание, правила оформления, положения инструкций по работе с результатами полевых измерений | Примерный перечень теоретических вопросов к зачёту: 1. Задачи дисциплины «Математическая обработка результатов измерений» 2. Что понимают под измерением физической величины? 3. Какие измерения называют прямыми, косвенными, равноточными и неравноточными? 4. Что является результатом измерения? |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|---------------------------------|--|---|
| | | <ol style="list-style-type: none"> 5. Что понимается под ошибкой (погрешностью) результата измерения? 6. Какие ошибки называются грубыми, систематическими, случайными? 7. Как вычислить вероятнейшее значение измеряемой величины по результатам многократных равноточных измерений? 8. Средняя квадратическая ошибка результатов равноточных измерений: формулы Гаусса, Бесселя, Ферреро. 9. Средняя квадратическая ошибка функции измеренных величин. 10. Средняя квадратическая ошибка результатов двойных равноточных измерений. 11. Средняя квадратическая ошибка простой арифметической середины. 12. Общая арифметическая середина. 13. Средняя квадратическая ошибка единицы веса. 14. Средняя квадратическая ошибка и вес общей арифметической середины. 15. Что понимается под уравниванием результатов измерений? 16. Уравнивание и оценка точности направлений, измеренных на станции способом круговых приёмов. 17. Что является условием и причиной возникновения задачи уравнивания? 18. Принцип наименьших квадратов. 19. Коррелятный способ уравнивания. 20. Параметрический способ уравнивания. 21. Как составляют условные уравнения? 22. Как составляют нормальные уравнения и вычисляются коэффициенты нормальных уравнений? 23. Алгоритм К. Ф. Гаусса решения систем нормальных уравнений? 24. Контроль решения нормальных уравнений. 25. Оценка точности измеренных величин и их функций при уравнивании коррелятным способом. |
| Уметь | пользоваться нормативной и научно-технической документацией, применять её для грамотного решения задач уравнивания | <p>Примерный перечень практических заданий:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Уравнивание одиночного нивелирного хода III класса; 2. Уравнивание сети нивелирования III класса с одной узловой точкой; |

| Структурный элемент компетенции | Планируемые результаты обучения | Оценочные средства |
|---------------------------------|--|---|
| | | 3. Уравнивание полигонометрического хода произвольной формы коррелантным способом. |
| Владеть | основными приемами работы с нормативной, научно-технической и охранной документацией | <p>Решить задачу: Выполнить уравнивание сети нивелирования III класса с одной узловой точкой.</p> |

б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:

Примерная структура и содержание пункта:

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория ошибок и уравнительные вычисления» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме зачета с оценкой.

Зачет с оценкой по данной дисциплине проводится в устной форме по билетам, каждый из которых включает 2 теоретических вопроса.

Показатели и критерии оценивания зачета с оценкой:

– на оценку **«отлично»** (5 баллов) – обучающийся демонстрирует высокий уровень сформированности компетенций, всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, свободно оперирует знаниями, умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.

– на оценку **«хорошо»** (4 балла) – обучающийся демонстрирует средний уровень сформированности компетенций: основные знания, умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности.

– на оценку **«удовлетворительно»** (3 балла) – обучающийся демонстрирует пороговый уровень сформированности компетенций: в ходе контрольных мероприятий допускаются ошибки, проявляется отсутствие отдельных знаний.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (2 балла) – обучающийся демонстрирует знания не более 20% теоретического материала, допускает существенные ошибки.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (1 балл) – обучающийся не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Общие сведения об измерениях

Объектом изучения науки Геодезия является планета Земля – ее форма, размеры, внешнее гравитационное поле. Эти характеристики получают из различных измерений, выполняемых на поверхности Земли.

Под *измерением* физической величины X понимают процесс сравнения этой величины с другой, однородной с ней величиной q , принятой в качестве *меры* - единицы измерения. Например, длину отрезка линии местности сравнивают с единицей линейных измерений - *метром*; горизонтальный угол, образованный отрезками линий на местности, сравнивают с градусом, градусом, радианом.

Измерения различают:

- *прямые*;
- *косвенные*;
- *равноточные*;
- *неравноточные*.

Под *прямыми* измерениями понимают такие, при которых определяемую величину получают путём непосредственного сравнения (сопоставления) её с единицей измерения или её производной. Например, длина отрезка линии измеряется стальной лентой или горизонтальный угол на местности измеряется теодолитом, а на бумаге транспортиром и т.д.

Косвенными называют измерения, определяемая величина в которых является функцией других непосредственно измеренных величин. Так, для определения длины окружности или площади круга, необходимо непосредственно измерить радиус окружности.

Равноточными называют измерения, выполненные приборами одного класса точности, специалистами равной квалификации, по одной и той же технологии, в идентичных внешних условиях. При несоблюдении хотя бы одного из перечисленных условий измерения считаются *неравноточными*.

Результатом измерения I является число, показывающее, во сколько раз определяемая величина больше или меньше величины, с которой её сравнивали, т.е. величины, принятой за единицу измерения.

Результаты измерений подразделяют на *необходимые* и *добавочные* (или *избыточные*). Так, если одна и та же величина (длина линии, угол треугольника и т.п.) измерена n раз, то один из результатов измерений является *необходимым*, а $(n - 1)$ - *добавочными*. Добавочные измерения имеют весьма важное значение: их сходимость является *средством контроля* и позволяет судить о *качестве* результатов измерений; они дают возможность получить *наиболее надежное значение* искомой величины по сравнению с любым отдельно взятым результатом измерения.

1.2. Погрешности результатов измерений

Результаты многократных измерений одной и той же физической величины (линии, угла, превышения и т.п.), как правило, различаются между собой и не совпадают с точным (истинным) значением измеряемой величины, т.е. содержат неизбежные погрешности, вызываемые различными причинами.

Под *погрешностью* Δ_i результата измерения I понимают разность между результатом измерения I физической величины и точным (истинным) значением X этой величины, т.е.

$$\Delta i = I_i - X \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

n - число выполненных измерений.

По своим свойствам, характеру возникновения и влияния на результаты измерений, их функции, погрешности подразделяют на *грубые, систематические и случайные*.

Грубые погрешности (промахи) возникают вследствие невнимательности наблюдателя, неисправности прибора, несоблюдении технологии работ, не учёта влияния изменяющихся внешних условий: температуры, ветра, видимости и т.п. Обнаружить грубые погрешности можно, используя геометрические свойства наблюдаемого объекта (например, сумму внутренних углов плоского многоугольника), а также выполнением повторных измерений. Так, например, при линейных измерениях, пропуск целого пролета, равного длине мерного прибора, можно обнаружить измерением отрезка линии нитяным дальномером, иногда - даже шагами.

К *систематическим* относят такие погрешности результатов измерений, которые входят в эти результаты по определенному закону.

Так, если известна длина меры при температуре t_0 , а измерение длины линии местности выполнены при температуре t , то результат измерения длины линии будет содержать систематическую погрешность, пропорциональную разности температур $(t - t_0)$ и длине линии. Влияние систематических погрешностей на результаты измерений исключают или сводят до пренебрегаемого малого значения выбором методики измерений или введением поправок в результаты.

Случайные погрешности результатов измерений характеризуются тем, что при одинаковых условиях измерений они могут меняться по величине и знаку; их нельзя заранее предусмотреть, определить закон воздействия на результат. Статистический анализ, т.е. анализ результатов больших рядов измерений, позволил для случайных погрешностей выявить ряд их свойств.

Первое свойство. Для данных условий измерений случайные погрешности по абсолютной величине не могут превосходить известного предела (свойство ограниченности), т.е.

$$|\Delta| \leq \Delta_{пред} \quad (2)$$

Второе свойство. Равные по абсолютной величине положительные и отрицательные случайные погрешности равновозможны, т.е. встречаются одинаково часто (свойство симметрии).

Третье свойство. Малые по абсолютной величине случайные погрешности при измерениях встречаются чаще, чем большие (свойство плотности).

Четвертое свойство. Среднее арифметическое из случайных погрешностей и их попарных произведений стремится к нулю при неограниченном возрастании числа измерений (свойство компенсации), т.е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[\Delta_j \Delta_k]}{n} = 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[\Delta_j]}{n} = 0, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $j = 1, 2, 3, \dots, n-1$; $k = 2, 3, 4, \dots, n$;

n - число измерений;

[] - Гауссов символ суммы.

1.3. Задачи теории погрешностей измерений

Как было отмечено выше, в результатах измерений неизбежно содержатся погрешности. Поэтому одной из задач теории погрешностей является изучение видов и свойств погрешностей измерений, причин их возникновения.

Далее, выполнив измерения, всегда стремятся определить точность полученных результатов. Поэтому в теории погрешностей измерений устанавливаются критерии для оценки точности результатов измерений.

Так как результаты измерений вследствие влияния погрешностей разнятся между собой, то возникает задача отыскания наиболее точного по вероятности значения определяемой величины из результатов многократных ее измерений.

Во многих случаях геодезической практики по результатам измерений вычисляют другие интересующие нас величины. Например, измерив сторону треугольника и два его угла, можно по известным формулам вычислить третий угол и две другие стороны. В таких случаях результаты вычислений являются функциями измеренных величин. По указанной причине, перед теорией погрешностей возникает задача, по оценке точности функций измеренных величин.

Перечисленные задачи, которые решаются теорией погрешностей измерений, имеют большое значение для правильной организации, проведения геодезических работ и использования их результатов.

Кроме того, теория погрешностей геодезических измерений позволяет обоснованно выбрать необходимые для измерений приборы и инструменты, рассчитать ожидаемую точность измерений и окончательного результата, правильно выбрать метод обработки результатов измерений.

1.4 Равноточные измерения

1.4.1 Вычисление наиболее точного по вероятности значения результата измерений одной и той же величины

Пусть некоторая величина, истинное (точное) значение которой равно X , измерена равно точно n раз и получены результаты этих измерений: $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$. Составим разности

$$\Delta_i = l_i - X \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

Δ_i - истинные случайные погрешности результатов l_i измерений, т.е. отклонения результатов измерений от истинного (точного) значения измеряемой величины.

Найдем сумму уравнений (4) и разделим ее на число измерений.

$$\frac{[\Delta]}{n} = \frac{[l]}{n} - X \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\frac{[\Delta]}{n} = \eta \quad (6)$$

$$\frac{[l]}{n} = x \quad (7)$$

Величину $x = [l]/n$ называют простой арифметической серединой или средним арифметическим из результатов l_i равноточных измерений. Выражение $\eta = [\Delta]/n = x - X$ - есть истинная случайная погрешность простой арифметической середины, т.е. это отклонение простой арифметической середины от истинного (точного) значения X измеряемой величины.

По четвертому свойству случайных погрешностей

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{[\Delta]}{n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \eta = 0, \quad (8)$$

значит

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{[l]}{n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} x = X \quad (9)$$

Таким образом, среднее арифметическое из результатов l_i равнозначных измерений стремится к истинному (точному) значению X измеряемой величины при неограниченном возрастании числа измерений. Величину x называют еще **вероятнейшим значением** измеряемой величины.

1.4.2 Оценка точности результатов ряда равнозначных измерений. Средняя квадратическая погрешность результата отдельного измерения. Предельная и относительная погрешности

В качестве критерия при оценке точности результатов геодезических измерений принята предложенная К.Ф. Гауссом *средняя квадратическая погрешность*, вычисляемая по формуле

$$m = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{n}} \quad (10)$$

где Δ - истинная случайная погрешность результата,
 n - число измерений.

По величине средней квадратической погрешности можно определить *предельную погрешность* $\Delta_{пред.}$, возможную для данного ряда измерений. В качестве предельной погрешности в геодезии принимают удвоенную среднюю квадратическую погрешность

$$\Delta_{пред} = 2m \quad (11)$$

Если в ряду случайных погрешностей результатов равнозначных измерений встречаются такие, которые по абсолютной величине превышают предельную, то такие погрешности считают грубыми. Измерения, в которых обнаружены эти погрешности, выполняют заново.

В ряде случаев для суждения о точности измерений недостаточно знания лишь абсолютного значения средней квадратической погрешности. Например, измерены три отрезка линий местности:

$L_1 = 240$ м с погрешностью $m_1 = \pm 0,15$ м;

$L_2 = 600$ м с погрешностью $m_2 = \pm 0,53$ м;

$L_3 = 500$ м с погрешностью $m_3 = \pm 0,29$ м.

Если сравнивать средние квадратические погрешности, то наиболее точно измерен первый отрезок. Однако, здесь следует учитывать и длину измеряемого отрезка, т.е. отнести погрешность к величине длины самого отрезка.

В подобных случаях вводят понятие *относительной погрешности*, под которой понимают отношение абсолютной величины средней квадратической погрешности m к значению результата l измеряемой величины, т.е.

$$\frac{m}{l} = \frac{1}{l:m} = \frac{1}{N} = 1:N \quad (12)$$

где $N = l:m$.

Для нашего примера относительные погрешности равны:

$$\frac{m_1}{L_1} = \frac{0,15}{240} = \frac{1}{240:0,15} = \frac{1}{1600}$$

$$\frac{m_2}{L_2} = \frac{0,53}{600} = \frac{1}{600:0,53} = \frac{1}{1100}$$

$$\frac{m_3}{L_3} = \frac{0,29}{500} = \frac{1}{500:0,29} = \frac{1}{1700}$$

Сравнивая дроби, видим, что третье измерение является самым точным.

В значении абсолютной величины средней квадратической погрешности и в знаменателе относительной погрешности следует удерживать две-три значащие цифры.

1.4.3 Вероятнейшие погрешности

Формула (10) К.Ф. Гаусса для средней квадратической погрешности справедлива в том случае, когда результаты l измерений сравниваются с истинным (точным) значением X этой величины. В большинстве случаев практики топографо-геодезических и маркшейдерских работ истинное значение X измеряемой величины неизвестно и поэтому используют вероятнейшее значение его x , определяемое по формуле (7). В этом случае среднюю квадратическую погрешность результата отдельного измерения ряда равнозначных измерений определяют по вероятнейшим погрешностям.

Пусть $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ - результаты равнозначных измерений одной и той же величины, $x = \frac{[l]}{n}$ - простая арифметическая середина.

Составим разности

$$l_i - x = v_i \quad (13)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$

n - число измерений;

v_i - вероятнейшие погрешности результатов l_i измерений, т.е. отклонения значений каждого результата l_i от простой арифметической середины, от вероятнейшего значения x измеряемой величины.

Сложим уравнения (13) и разделим на их число

$$\frac{[l]}{n} - x = \frac{[v]}{n} \quad (14)$$

но $x = \frac{[l]}{n}$,

тогда $[v] = 0$

(15)

т.е. сумма вероятнейших погрешностей результатов равнозначных измерений равна нулю при любом числе измерений.

Составим разности уравнений (1) и (13)

$$\Delta_i - v_i = l_i - X - l_i + x \quad (16)$$

но, $x - X = \eta = [\Delta]/n$ - истинная случайная погрешность простой арифметической середины, тогда

$$\Delta_i = v_i + \eta \quad (17)$$

Выражение (17) есть уравнение связи истинных и вероятнейших погрешностей результатов равнозначных измерений.

Возведем уравнения (17) в квадрат, сложим и разделим на их число

$$\frac{[\Delta^2]}{n} = \frac{[v^2]}{n} + \eta^2 + 2\eta \frac{[v]}{n} \quad (18)$$

но $\frac{[\Delta^2]}{n} = m^2$; $[v] = 0$; $\eta^2 = \frac{[\Delta^2]}{n^2}$;

тогда $m^2 = \frac{[v^2]}{n} + \frac{[\Delta^2]}{n}$

(19)

Второй член правой части уравнения (19) запишем в виде

$$\eta^2 = \frac{[\Delta]^2}{n^2} = \frac{(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n)^2}{n^2} = \frac{[\Delta^2] + 2[\Delta_j \Delta_k]}{n^2} = \frac{[\Delta^2]}{n^2} + 2 \frac{[\Delta_j \Delta_k]}{n^2} \quad (20)$$

но $\frac{[\Delta]}{n} = m^2$; $\frac{[\Delta_j \Delta_k]}{n} = 0$; - по четвертому свойству случайных погрешностей.

Уравнение (19) с учетом (20) примет вид

$$m^2 = \frac{[v^2]}{n} + \frac{m^2}{n} \quad (21)$$

или
$$m^2 = \frac{[v^2]}{n-1} \quad (22)$$

Окончательно
$$m = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}$$
.

Выражение (23) является *формулой Бесселя* для средней квадратической погрешности результата отдельного измерения ряда равноточных измерений одной величины.

Практические рекомендации по вычислению простой арифметической середины:

1. Выбирают приближенное значение x' простой арифметической середины, в качестве которого лучше всего взять наименьшее из результатов l_i измерений, т.е.

$$x' = l_{i \min} \quad (24)$$

2. Находят разности

$$\varepsilon_i = l_i - x' \quad (25)$$

3. Вычисляют простую арифметическую середину

$$x = x' + \frac{[\varepsilon]}{n} \quad (26)$$

Оценка точности функций измеренных величин

В большинстве случаев практики топографо-геодезических и маркшейдерских работ искомые величины получают в результате вычислений как функции измеренных величин. Полученные при этом результаты будут содержать погрешности, которые зависят как от погрешностей аргументов (измеренных величин), так и от вида функций.

Возникает задача оценки точности функций измеренных аргументов.

1.4.4 Средняя квадратическая погрешность функции общего вида

Дана функция

$$U = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (27)$$

где $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ - точные (истинные) значения измеряемых величин.

Пусть в результате измерений получены приближенные значения $l_1, l_2, l_3, l_4, \dots, l_k$ этих величин.

Тогда

$$u = f(l_1, l_2, l_3, \dots, l_k) \quad (28)$$

- приближенное значение функции U .

Составим разность уравнений (27) и (28)

$$\Delta u = u - U = f(l_1, l_2, l_3, \dots, l_k) - f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_k) \quad (29)$$

которая является истинной случайной погрешностью функции U .

Разности

$$\Delta_i = l_i - X_i \quad (30)$$

- суть истинные случайные погрешности аргументов l_i , где $i = 1, 2, \dots, k$.

Тогда

$$\Delta u = f(l_1, l_2, l_3, \dots, l_k) - f(l_1 - \Delta_1, l_2 - \Delta_2, \dots, l_k - \Delta_k) \quad (31)$$

Чтобы найти линейную зависимость между погрешностями аргументов и погрешностью функции, продифференцируем функцию (28).

$$du = \frac{\partial f}{\partial l_1} dl_1 + \frac{\partial f}{\partial l_2} dl_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial l_k} dl_k \quad (32)$$

где $\frac{\partial f}{\partial l_1}, \frac{\partial f}{\partial l_2}, \dots, \frac{\partial f}{\partial l_k}$ - частные производные функции по каждому из аргументов.

Заменим в выражении (32) дифференциалы истинными случайными погрешностями функции и аргументов

$$\Delta u = \frac{\partial f}{\partial l_1} \Delta_1 + \frac{\partial f}{\partial l_2} \Delta_2 + \frac{\partial f}{\partial l_3} \Delta_3 + \dots + \frac{\partial f}{\partial l_k} \Delta_k \quad (33)$$

При многократном измерении аргументов, например n раз, получим

$$\Delta u_i = \frac{\partial f}{\partial l_{1,i}} \Delta_{1,i} + \frac{\partial f}{\partial l_{2,i}} \Delta_{2,i} + \dots + \frac{\partial f}{\partial l_{k,i}} \Delta_{k,i} \quad (34)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, k$.

Производные функции по соответствующим аргументам в разных измерениях практически остаются постоянными и могут быть вычислены по приближенным значениям аргументов $l_{1,0}, l_{2,0}, l_{3,0}, \dots, l_{k,0}$, в качестве которых можно взять $l_{1,0} = l_{1,1}, l_{2,0} = l_{2,1}, \dots, l_{k,0} = l_{k,1}$, т.е. значения аргументов, полученные при первом измерении определяемых величин.

В соответствии с этим можно принять

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial l_{1,1}} \approx \frac{\partial f}{\partial l_{1,2}} \approx \frac{\partial f}{\partial l_{1,3}} \approx \dots \approx \frac{\partial f}{\partial l_{1,k}} \approx \left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0, \\ \frac{\partial f}{\partial l_{2,1}} \approx \frac{\partial f}{\partial l_{2,2}} \approx \frac{\partial f}{\partial l_{2,3}} \approx \dots \approx \frac{\partial f}{\partial l_{2,n}} \approx \left(\frac{\partial f}{\partial l_2} \right)_0, \\ \dots \\ \frac{\partial f}{\partial l_{k,1}} \approx \frac{\partial f}{\partial l_{k,2}} \approx \frac{\partial f}{\partial l_{k,3}} \approx \dots \approx \frac{\partial f}{\partial l_{k,n}} \approx \left(\frac{\partial f}{\partial l_k} \right)_0 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

С учетом (35) выражение (34) примет вид

$$\Delta u_i = \left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0 \Delta_{1,i} + \left(\frac{\partial f}{\partial l_2} \right)_0 \Delta_{2,i} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial l_k} \right)_0 \Delta_{k,i} \quad (36)$$

Возведем уравнения (36) в квадрат, сложим и разделим на их число

$$\frac{[\Delta u^2]}{n} = \left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0^2 \frac{[\Delta l_1^2]}{n} + \left(\frac{\partial f}{\partial l_2} \right)_0^2 \frac{[\Delta l_2^2]}{n} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial l_k} \right)_0^2 \frac{[\Delta l_k^2]}{n} + 2 \left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0 \left(\frac{\partial f}{\partial l_2} \right)_0 \frac{[\Delta l_1 \Delta l_2]}{n} + 2 \left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0 \left(\frac{\partial f}{\partial l_3} \right)_0 \frac{[\Delta l_1 \Delta l_3]}{n} \quad (37)$$

На основании (3) и (8) можно записать

$$\frac{[\Delta_1 \Delta_2]}{n} = 0, \frac{[\Delta_1 \Delta_3]}{n} = 0, \dots, \frac{[\Delta_{k-1} \Delta_k]}{n} = 0,$$

$$u \frac{[\Delta u^2]}{n} = m_u^2, \frac{[\Delta_1^2]}{n} = m_1^2, \frac{[\Delta_2^2]}{n} = m_2^2, \dots, \frac{[\Delta_k^2]}{n} = m_k^2 \quad (38)$$

Выражение (37) с учетом (38) примет вид

$$m_u^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial l_2} \right)_0^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial l_k} \right)_0^2 m_k^2 \quad (39)$$

или

$$m_u = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial l_1} \right)_0^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial l_2} \right)_0^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial l_k} \right)_0^2 m_k^2} \quad (40)$$

Таким образом, *средняя квадратическая погрешность функции независимых аргументов равна корню квадратному из суммы квадратов произведений частных производных функции по каждому из аргументов на средние квадратические погрешности соответствующих аргументов.*

1.4.5 Средняя квадратическая погрешность простой арифметической середины

Формулу (7) для простой арифметической середины перепишем в виде

$$x = \frac{[l]}{n} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{n} = \frac{1}{n} l_1 + \frac{1}{n} l_2 + \dots + \frac{1}{n} l_n \quad (41)$$

где l_i - результаты равноточных измерений одной и той же величины;

$i = 1, 2, 3, \dots, n$;

n - число измерений.

Из уравнения (39) имеем

$$m_x^2 = M^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial l_1} \right)^2 m_1^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial l_2} \right)^2 m_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial x}{\partial l_n} \right)^2 m_n^2$$

Но $\frac{\partial x}{\partial l_i} = \frac{1}{n}$, тогда

$$m_1 = m_2 = \dots = m_n = m.$$

$$M^2 = \frac{1}{n^2} m_1^2 + \frac{1}{n^2} m_2^2 + \dots + \frac{1}{n^2} m_n^2 \quad (42)$$

Так как измерения равноточные, т.е. $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$ (43)

Следовательно, выражение (42) примет вид

$$M^2 = n \frac{1}{n^2} m^2 = \frac{m^2}{n}, \quad (44)$$

откуда

$$M = \frac{m}{\sqrt{n}} \quad (45)$$

Средняя квадратическая погрешность простой арифметической середины в \sqrt{n} раз меньше средней квадратической погрешности результата каждого отдельного измерения.

Сравнивая формулу (44) и второй член правой части уравнения (21), можно сделать вывод, что

$$\eta^2 = \frac{m^2}{n}, \eta = \frac{m}{\sqrt{n}} = M,$$

т.е. истинная случайная погрешность простой арифметической середины равна средней квадратической погрешности простой арифметической середины.

1.4.6 Оценка точности результатов угловых измерений в триангуляции

Известно, что сумма внутренних углов плоского треугольника равна 180° ,

$$\text{т.е. } \beta_{1,0} + \beta_{2,0} + \beta_{3,0} = 180^\circ \quad (46)$$

где $\beta_{1,0}, \beta_{2,0}, \beta_{3,0}$ - истинные (точные) значения углов.

Пусть $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ - результаты измерения этих углов, т.е. приближенные значения углов.

Тогда, согласно (1), имеем

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 - \beta_{1,0} &= \Delta_1, \\ \beta_2 - \beta_{2,0} &= \Delta_2, \\ \beta_3 - \beta_{3,0} &= \Delta_3, \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ - истинные случайные погрешности результатов измерений.

Перепишем равенство (46) с учетом формул (47)

$$(\beta_1 - \Delta_1) + (\beta_2 - \Delta_2) + (\beta_3 - \Delta_3) = 180^\circ; \quad (48)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3) = 180^\circ; \quad (49)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - 180^\circ = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3. \quad (50)$$

Обозначим

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = \omega. \quad (51)$$

ω - называют *угловой невязкой* в треугольнике, т.е. это истинная случайная погрешность суммы внутренних углов треугольника.

Тогда уравнение (50) можно записать в виде

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - 180^\circ = \omega, \quad (52)$$

или

$$\sum_1^3 \beta - 180^\circ = \omega. \quad (53)$$

Пусть равномерно измерены углы в n треугольниках, для каждого из которых справедливы равенства (51), т.е.

$$\Delta_{1,i} + \Delta_{2,i} + \Delta_{3,i} = \omega_i. \quad (54)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ - номер треугольника.

Возведем уравнения (54) в квадрат, сложим и разделим на их число:

$$\frac{[\Delta_1^2]}{n} + \frac{[\Delta_2^2]}{n} + \frac{[\Delta_3^2]}{n} + 2 \frac{[\Delta_1 \Delta_2]}{n} + 2 \frac{[\Delta_1 \Delta_3]}{n} + 2 \frac{[\Delta_2 \Delta_3]}{n} = \frac{[\omega^2]}{n}. \quad (55)$$

На основании (3) и (7) можно записать

$$\frac{[\Delta_1 \Delta_2]}{n} = 0; \frac{[\Delta_1 \Delta_3]}{n} = 0; \frac{[\Delta_2 \Delta_3]}{n} = 0;$$

$$\frac{[\Delta_1^2]}{n} = m_1^2; \frac{[\Delta_2^2]}{n} = m_2^2; \frac{[\Delta_3^2]}{n} = m_3^2.$$

Тогда

$$\frac{[\omega^2]}{n} = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2, \quad (56)$$

где m_1, m_2, m_3 - средние квадратические погрешности результатов измерений углов $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ в каждом из треугольников.

Так как измерения равноточные, т.е. $m_1 = m_2 = m_3 = m_\beta$, то

$$\frac{[\omega^2]}{n} = 3m_\beta^2, \quad (57)$$

или

$$m_\beta = \sqrt{\frac{[\omega^2]}{3n}}. \quad (58)$$

Это формула Ферреро, по которой обычно выполняется оценка точности результатов измерений горизонтальных углов в триангуляции.

1.4.7 Оценка точности результатов ряда двойных равноточных измерений

Очень часто в практике геодезических и маркшейдерских работ искомую величину определяют по результатам двукратных равноточных измерений этой величины. Например, горизонтальные углы измеряют двумя полуприёмами, превышение на станции при геометрическом нивелировании определяется по черным и красным сторонам реек, длины отрезков линий местности находят из результатов измерений этих отрезков в прямом и обратном направлениях.

Возникает задача оценки точности этих результатов.

Имеем ряд величин, истинные значения которых равны

$$L_1, L_2, L_3, \dots, L_n. \quad (59)$$

Пусть каждая из этих величин измерена равноточно дважды и получены результаты:

$$l_1, l_2, l_3, \dots, l_n; \quad (60)$$

$$l'_1, l'_2, l'_3, \dots, l'_n, \quad (61)$$

Составим разности между результатами измерений и их истинными значениями:

$$l_i - L_i = \Delta_i; \quad (62)$$

$$l'_i - L_i = \Delta'_i, \quad (63)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Найдем разности уравнений (62) и (63)

$$l'_i - l_i = \Delta'_i - \Delta_i \quad (64)$$

и обозначим

$$\Delta'_i - \Delta_i = d_i, \quad (65)$$

здесь Δ'_i и Δ_i - истинные случайные погрешности результатов.

Возведем уравнения (65) в квадрат, сложим и разделим на их число

$$\frac{[\Delta'^2]}{n} + \frac{[\Delta^2]}{n} + 2 \frac{[\Delta' \Delta]}{n} = \frac{[d^2]}{n}. \quad (66)$$

На основании (3) и (7) запишем

$$\frac{[\Delta'^2]}{n} = m'^2; \quad \frac{[\Delta^2]}{n} = m^2; \quad \frac{[\Delta' \Delta]}{n} = 0,$$

тогда

$$m'^2 + m^2 = \frac{[d^2]}{n}. \quad (67)$$

Так как измерения равноточные, т.е. $m' = m = m_i$, то

$$2m_i^2 = \frac{[d^2]}{n}, m_i = \sqrt{\frac{[d^2]}{2n}}. \quad (68)$$

При двойных равноточных измерениях за окончательное значение принимают среднее арифметическое из результатов отдельных измерений, т.е.

$$l_0 = \frac{l+l'}{2},$$

тогда

$$m_{l_0} = \frac{m_i}{\sqrt{2}} \text{ или } m_{l_0} = 0,5 \sqrt{\frac{[d'^2]}{n}} \quad (69)$$

Формулы (68) и (69) справедливы лишь в том случае, если разности d_i не содержат систематических погрешностей.

Пусть разности содержат систематическую погрешность θ , т.е.

$$d_i = \Delta'_i - \Delta_i + \theta. \quad (70)$$

Сложим уравнения (70) и разделим на их число

$$\frac{[d]}{n} = \frac{[\Delta']}{n} - \frac{[\Delta]}{n} + \theta. \quad (71)$$

На основании четвертого свойства случайных погрешностей имеем

$$\frac{[\Delta']}{n} = 0, \frac{[\Delta]}{n} = 0,$$

т.е.

$$\frac{[d]}{n} = \theta \quad (72)$$

Среднее арифметическое из разностей результатов двойных равноточных измерений отлично от нуля и численно равно систематической погрешности этих результатов.

Вычтем из каждой разности d_i величину систематической погрешности θ , т.е. образуем новые разности

$$d'_i = d_i - \theta \quad (73)$$

Сложив равенства (73) и поделив их на n , получим

$$\frac{[d']}{n} = \frac{[d]}{n} - \theta,$$

но

$$\frac{[d]}{n} = \theta,$$

тогда

$$\frac{[d']}{n} = 0, \quad (74)$$

т.е. среднее арифметическое из разностей результатов двойных равноточных измерений, свободных от систематических погрешностей, всегда равно нулю. Разности d' , как отклонения d_i от простой арифметической середины и обладающие свойством $[d'] = 0$, можно считать вероятнейшими погрешностями разностей d_i .

Применяя к ним формулу **Бесселя** для средней квадратической погрешности, запишем

$$m_d = \sqrt{\frac{[d'^2]}{n-1}}, \quad (75)$$

$$a \quad m_l = \frac{m_d}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{[d'^2]}{2(n-1)}}. \quad (76)$$

Средняя квадратическая погрешность среднего арифметического из результатов l_i и l'_i будет равна

$$m_{l_0} = \frac{m_l}{\sqrt{2}} = 0,5 \sqrt{\frac{[d'^2]}{n-1}}. \quad (77)$$

Вычисление значения числителя подкоренного выражения можно проконтролировать по формуле

$$[d'^2] = [d^2] - \frac{[d]^2}{2}. \quad (78)$$

Примечание. Оценку точности по разностям результатов двойных равноточных измерений следует выполнять по формулам (68) и (69), если разности удовлетворяют условию

$$|[d]| \leq 0,25|[d]|, \quad (79)$$

в противном случае, по формулам (75) - (77).

1.4.8 Примеры оценки точности результатов равноточных измерений одной величины и функций независимо измеренных величин

Задача 1. По результатам равноточных измерений горизонтального угла девятью приемами (см. табл. 1) найти наиболее точное по вероятности значение угла, средние квадратические погрешности измерения каждого отдельного угла и простой арифметической середины.

Таблица 1

Оценка точности результатов измерения отдельного горизонтального угла

| Номера приемов в i | Результаты измерений β_i | ε_i | ε_i^2 | v_i | v_i^2 | Основные формулы, вспомогательные вычисления |
|---------------------------------------|--|--|-------------------|-------|---------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 32° 23' 44" | + 4 | 16 | -0,6" | 0,36 | 1. $\beta' = \beta_{i,min}$ |
| 2 | 40 | 0 | 0 | -4,6 | 21,16 | 2. $\varepsilon_i = \beta_i - \beta'$ |
| 3 | 43 | + 3 | 9 | -1,6 | 2,56 | 3. $\beta = \beta' + [\varepsilon]/n = 32^\circ 23' 44,56''$ |
| 4 | 45 | + 5 | 25 | +0,4 | 0,16 | |
| 5 | 46 | + 6 | 36 | +1,4 | 1,96 | 4. $\beta_{окр.} = 32^\circ 23' 44,6''$ |
| 6 | 43 | + 3 | 9 | -1,6 | 2,56 | |
| 7 | 48 | + 8 | 64 | +3,4 | 11,56 | 5. $\delta = \beta - \beta_{окр.} = -0,04''$ |
| 8 | 45 | + 5 | 25 | +0,4 | 0,16 | |
| 9 | 32° 23' 47" | + 7 | 49 | +2,4 | 5,76 | 6. $v_i = \beta_i - \beta_{окр.}$ |
| Σ | | 42 | 233 | -0,4 | 46,20 | 7. $[v] = v_1 + v_2 + \dots + v_n$ |
| β' β $\beta_{окр.}$ | 32° 23' 40" 32° 23' 44,56" 32° 23' 44,6" | $[\varepsilon]^2 = 1681$ Окончательный результат : $\beta = 32^\circ 23' 44,6'' \pm 0,80''$ $m_\beta = \pm 2,4''$ $M = \pm 0,80''$ | | | | Контроль: $[v] = \delta \cdot n$ $[v^2] = [\varepsilon^2] - \frac{[\varepsilon]^2}{n}$ $m_\beta = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}}$ |

Вычисления выполняют в следующей последовательности:

1. Выбирают приближенное значение β' простой арифметической середины как наименьшее из результатов измерений, т.е. $\beta' = \beta_{i,min}$. В нашем примере это значение равно $\beta' = \beta_2 = 32^\circ 23' 40''$.

2. Вычисляют уклонения ε_i результатов измерений β_i от этого приближенного значения $\varepsilon_i = \beta_i - \beta'$ и сумму этих уклонений

$$[\varepsilon] = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n.$$

3. В колонке 4 табл.2 вычисляют квадраты ε^2 и их сумму $[\varepsilon^2]$.

4. Вычисляют простую арифметическую середину β - наиболее точное по вероятности значение измеряемого угла.

5. Находят вероятнейшие погрешности u_i как разности результатов отдельных измерений и округленного значения $\beta_{окр}$, т.е., $u_i = \beta_i - \beta_{окр}$. их сумму $[u] = u_1 + u_2 + \dots + u_n$ с контролем $[u] = \delta \cdot n$, где $\delta = \beta - \beta_{окр}$ - погрешность округления среднего арифметического.

6. В графе 6 вычисляют квадраты вероятнейших погрешностей u_i^2 и их сумму $[u^2] = u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2$ с контролем $[u^2] = [\varepsilon^2] - \frac{[\varepsilon]^2}{n}$.

7. По формуле (23) Бесселя вычисляют среднюю квадратическую погрешность результата каждого отдельного измерения:

$$m_\beta = \sqrt{\frac{[u^2]}{n-1}}$$

8. По формуле (44) находят среднюю квадратическую погрешность простой арифметической середины:

$$M = \frac{m_\beta}{\sqrt{n}}$$

9. Окончательный результат записывают в виде

$$\beta = \beta_{окр} \pm M.$$

Задача 2. В каждом треугольнике микротриангуляции (рис. 1) измерено одинаково точно по три внутренних горизонтальных угла (см. табл. 2). Вычислить среднюю квадратическую погрешность результатов измерений каждого отдельного угла, применив формулу Ферреро:

$$m_\beta = \sqrt{\frac{[\omega^2]}{3n}},$$

где $\omega_i = [\beta] - 180^\circ$ - угловые невязки в треугольниках; n - число треугольников.

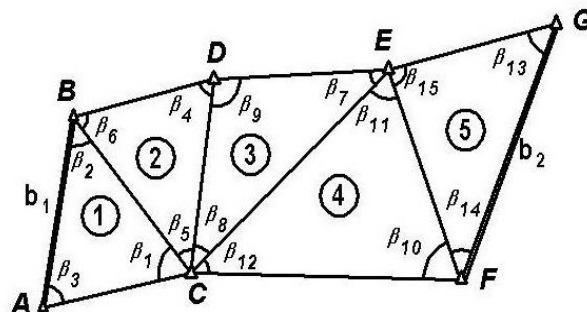


Рис. 1. Схема сети микротриангуляции

Таблица 2

Обработка результатов угловых измерений в микротриангуляции

| Номера треугольников и значения измеренных углов | |
|--|--|
|--|--|

| Названия углов | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|
| β_1 | 80° 07,7' | 74° 21,6' | 36° 39,2' | 39° 17,4' | 69° 49,6' |
| β_2 | 50 58,3 | 64 35,5 | 71 49,6 | 96 15,8 | 36 39,2 |
| β_3 | 48 53,1 | 41 01,8 | 71 32,6 | 44 26,1 | 73 32,4 |
| $\Sigma \beta$ | 179° 59,1' | 179° 58,9' | 180° 01,4' | 179° 59,3' | 180° 01,2' |
| $\omega_\beta = \Sigma \beta - 180^\circ$ | - 0,9' | - 1,1' | + 1,4' | - 0,7' | + 1,2' |
| ω^2 | 0,81 | 1,21 | 1,96 | 0,49 | 1,44 |

$$m_\beta = \sqrt{\frac{5,91}{15}} = \sqrt{0,394} = \pm 0,63'.$$

Задача 3. В теодолитном ходе равномерно измерено 11 горизонтальных углов, каждый со средней квадратической погрешностью $m_\beta = \pm 0,5'$. Определить среднюю квадратическую и предельную погрешности суммы этих углов.

Имеем функцию $u = \Sigma \beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_{11}$.

Частные производные ее по каждому из аргументов равны $\frac{\partial u}{\partial \beta} = 1$.

Тогда $m_u = m_{\Sigma \beta} = m_\beta \sqrt{n} = 0,5' \sqrt{11} = \pm 1,66'$;

и $\Delta_{пред.} = 2 m_u = 2 \cdot 1,66' \approx \pm 3,3'$.

Задача 4. Горизонтальный угол β (см. рис. 2) измерен теодолитом 2Т30 одним полным приемом способом «приемов». Определить среднюю квадратическую погрешность среднего арифметического из значений результатов измерений угла в полуприемах, если средняя квадратическая погрешность отсчетов по лимбу составила $m_0 = \pm 0,5'$. Другими погрешностями пренебречь.

Значение угла в полуприемах вычисляют по формулам:

$$\beta_L = c'_L - a'_L; \beta_R = c'_R - a'_R,$$

где c'_L, c'_R, a'_L, a'_R - отсчеты по горизонтальному кругу при визировании на точки С и А при положении вертикального круга слева (КЛ) и справа (КП).

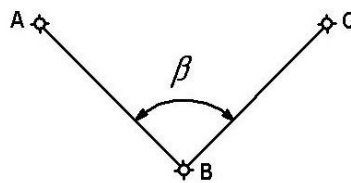


Рис. 2. Схема наблюдений

Вероятнейшее значение горизонтального угла по результатам, полученным в каждом полуприеме, вычисляют по формуле

$$\beta_{cp.} = \frac{\beta_L + \beta_R}{2} = \frac{c'_L - a'_L + c'_R - a'_R}{2} = \frac{1}{2} c'_L - \frac{1}{2} a'_L + \frac{1}{2} c'_R - \frac{1}{2} a'_R.$$

На основании формул (39) – (42) запишем

$$m_{\beta, cp.} = m_0 \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 \right]} = 0,5 \sqrt{4 \cdot \frac{1}{4}} = \pm 0,5'.$$

Эту же задачу решим иначе.

1. Определим среднюю квадратическую погрешность результатов измерений угла, полученных в каждом полуприеме

$$m_\beta^2 = m_a^2 + m_c^2, \text{ но } m_a = m_c = m_0 = \pm 0,5'$$

тогда

$$m_{\beta} = m_0 \sqrt{2} = \pm 0,5' \sqrt{2}$$

2. По формуле (42) вычислим среднюю квадратическую погрешность среднего арифметического значения угла, полученного из результатов в каждом полуприеме:

$$m_{\beta, \text{ср.}} = \frac{m_{\beta}}{\sqrt{2}} = \frac{0,5 \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = \pm 0,5'.$$

Задача 5. Вычислить среднюю квадратическую и предельную погрешности превышения, определенного на станции при геометрическом нивелировании по двум сторонам нивелирных шашечных реек, если:

- цена деления шкалы рейки $\mu = 10$ мм,
- средняя квадратическая погрешность отсчета по рейке $m_o = \pm 1$ мм.

Другими погрешностями пренебречь.

Превышение вычисляют по формулам:

$$h^u = a^u - b^u; h^k = a^k - b^k; h_{\text{ср.}} = \frac{h^u + h^k}{2}$$

где a^u, b^u - отсчеты по черным сторонам реек, устанавливаемых в задней и передней точках нивелирного хода;

a^k, b^k - то же, по красным сторонам реек.

Перепишем последнюю формулу в виде

$$h_{\text{ср.}} = \frac{a^u - b^u + a^k - b^k}{2} = \frac{1}{2} a^u - \frac{1}{2} b^u + \frac{1}{2} a^k - \frac{1}{2} b^k.$$

Согласно формулам (41) – (44) имеем

$$m_{h, \text{ср.}} = m_0 \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 \right]} = 1 \text{ мм} \sqrt{4 \frac{1}{4}} = \pm 1 \text{ мм};$$

$$\Delta h_{\text{пред.}} = 2 m_{h, \text{ср.}} = \pm 2, \text{ мм}.$$

Задача 6. Вычислить среднюю квадратическую погрешность результата определения превышения способом тригонометрического нивелирования, если превышение вычислено по формуле

$$h = h' + i - l, \quad (80)$$

где $h' = d \tan \nu$, $d = 153,84$ м – горизонтальное проложение линии местности, измеренное с относительной погрешностью 1:2000, $\nu = + 3^{\circ} 13'$ – угол наклона линии визирования, измеренный со средней квадратической погрешностью $m_{\nu} = \pm 0,5'$, $i = 1,47$ м – высота прибора (теодолита), измеренная с погрешностью $m_i = \pm 0,002$ м.

1. Вычислим превышение: $h = d \tan \nu + i - l = 153,83 \cdot 0,05620 + 1,47 - 2,00 = +8,12$ м.

2. Определим частные производные функции (78) по каждому из аргументов:

$$\frac{\partial h}{\partial d} = \tan \nu; \frac{\partial h}{\partial \nu} = \frac{d}{(\cos \nu)^2}; \frac{\partial h}{\partial i} = 1; \frac{\partial h}{\partial l} = -1.$$

3. На основании формулы (38) запишем

$$m_h = \sqrt{(m_d \cdot \tan \nu)^2 + \left(\frac{m_{\nu}}{\rho \cdot (\cos \nu)^2} \right)^2 + m_i^2 + m_l^2},$$

где $\rho = 206265'' = 3437,75' = 57,2958^{\circ}$ - радиан.

4. С учетом $\frac{m_d}{d} = \frac{1}{2000}$; $m_d = \frac{d}{2000} = \frac{153,84}{2000} = \pm 0,077$ м

вычислим

$$m_h = \sqrt{(4,32 \cdot 10^{-3})^2 + (22,4 \cdot 10^{-3})^2 + (5 \cdot 10^{-3})^2 + (2 \cdot 10^{-3})^2} = 10^{-3} \sqrt{18,66 + 501,8 + 25 + 4} = 23,4 \cdot 10^{-3} = \pm 0,023 \text{ м}.$$

1. Окончательно $h = +8,12 \pm 0,023$ м.

2.

Задача 7. В треугольнике ABC (рис.3) равноточно измерены три угла β, α, γ и сторона AB = c. Определить длины сторон **a** и **b**, средние квадратические и относительные погрешности этих сторон, если: средние квадратические погрешности результатов

измерений углов равны $m_\beta = m_\alpha = m_\gamma = \pm 0,5'$; относительная погрешность результата измерения стороны c составила $m_c : c = 1:2000$.

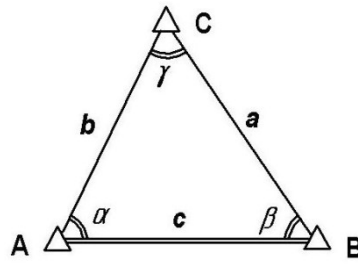


Рис. 3. К решению треугольника

Исходные данные, результаты вычислений и оценка точности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Решение треугольника

| № вершин | Результаты измерений углов | Поправки v_β | Уравненные углы | Синусы углов | Длины сторон d , м | m_d , мм | $\frac{m_d}{d}$ |
|----------------|----------------------------|--------------------|-----------------|--|----------------------|------------|-----------------|
| С (γ) | 58° 14,7' | 0,2' | 58° 14,5' | 0,85028 | 156,82 | 78 | 1:2000 |
| В (β) | 62 52,1 | 0,2 | 62 51,9 | 0,88993 | 164,13 | 84 | 1:1950 |
| А (α) | 58 53,9 | 0,2 | 58 53,6 | 0,85621 | 157,91 | 81 | 1:1940 |
| $\sum \omega$ | 180°00,7' + 0,7' | - 0,7' | 180°00,0' | $\Delta \omega = 1,0 \sqrt{3} = \pm 1,7'$ $v_\beta = \frac{-\omega}{3} = -0,2'$ | | | |

Основные формулы:

$$a = \frac{c}{\sin \gamma} \sin \alpha; b = \frac{c}{\sin \gamma} \sin \beta; \quad (81)$$

$$\ln b = \ln c - \ln \sin \gamma + \ln \sin \beta, \quad (82)$$

$$\ln a = \ln c - \ln \sin \gamma + \ln \sin \alpha. \quad (83)$$

Продифференцируем уравнения (82) и (83):

$$\frac{db}{b} = \frac{dc}{c} - \frac{\cos \gamma}{\sin \gamma} \cdot \frac{d\gamma}{\rho} + \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \cdot \frac{d\beta}{\rho}; \quad (84)$$

$$\frac{da}{a} = \frac{dc}{c} - \frac{\cos \gamma}{\sin \gamma} \cdot \frac{d\gamma}{\rho} + \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{\rho}. \quad (85)$$

На основании формул (27) – (40) запишем:

$$\left(\frac{m_b}{b}\right)^2 = \left(\frac{m_c}{c}\right)^2 + \left(\operatorname{ctg} \gamma \frac{m_\gamma}{\rho}\right)^2 + \left(\operatorname{ctg} \beta \frac{m_\beta}{\rho}\right)^2; \quad (86)$$

$$\left(\frac{m_a}{a}\right)^2 = \left(\frac{m_c}{c}\right)^2 + \left(\operatorname{ctg} \gamma \frac{m_\gamma}{\rho}\right)^2 + \left(\operatorname{ctg} \alpha \frac{m_\alpha}{\rho}\right)^2. \quad (87)$$

Подставляя численные значения в уравнения (86) и (87), получим:

$$\left(\frac{m_b}{b}\right)^2 = \left(\frac{1}{2000}\right)^2 + \left(0,619 \frac{0,5}{3438}\right)^2 + \left(0,512 \frac{0,5}{3438}\right)^2 = \left(\frac{1}{1950}\right)^2;$$

$$\frac{m_b}{b} = \frac{1}{1950}; m_b = \pm 0,084 \text{ м};$$

$$\left(\frac{m_a}{a}\right)^2 = \left(\frac{1}{2000}\right)^2 + \left(0,619 \frac{0,5}{3438}\right)^2 + \left(0,603 \frac{0,5}{3438}\right)^2 = \left(\frac{1}{1940}\right)^2;$$

$$\frac{m_a}{a} = \frac{1}{1940}; m_a = \pm 0,081 \text{ м.}$$

Задача 8. Определить средние квадратические погрешности:

- результатов отдельных измерений;
- средних арифметических значений из результатов двойных равноточных измерений длин сторон теодолитного хода;
- относительные погрешности этих сторон.

Исходные данные и математическая обработка результатов измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка точности результатов двойных равноточных измерений

| Номера сторон | Результаты измерений длин сторон хода, м | | $l_{\text{среднее}}, \text{ м}$ | $d, \text{ см}$ | $d^2, \text{ см}^2$ | $d', \text{ см}$ | $d'^2, \text{ см}^2$ | $\frac{m_{l, \text{ср.}}}{l_{\text{ср.}}}$ |
|--|--|----------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------|--|----------------------|--|
| | $l_{\text{прямо}}$ | $l_{\text{обратно}}$ | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 145,65 | 145,74 | 145,695 | - 9 | 81 | -4,5 | 20,25 | 1:4900 |
| 2 | 156,09 | 156,09 | 156,090 | 0 | 0 | 4,5 | 20,25 | 1:5200 |
| 3 | 205,58 | 205,62 | 205,600 | - 4 | 16 | 0,5 | 0,25 | 1:6900 |
| 4 | 144,67 | 144,63 | 144,650 | 4 | 16 | 8,5 | 72,25 | 1:4800 |
| 5 | 174,56 | 174,69 | 174,625 | -13 | 169 | -8,5 | 72,25 | 1:5800 |
| 6 | 125,51 | 125,26 | 125,235 | - 5 | 25 | -0,5 | 0,25 | 1:4200 |
| $m_d = \pm 6,1 \text{ см}$ $m_l = \pm 4,3 \text{ см}$ $m_{l, \text{ср.}} = \pm 3,0 \text{ см}$ | | | $[] = \Sigma$ [d] [d] | -27 27 35 | 307 | 0,0 Контроль : [d' ²]=185,50 | 185,50 | $\theta = -$ 4,5 см |

Обработку результатов измерений выполняют в следующей последовательности.

1. В колонки 2 и 3 таблицы 4 выписывают из полевых журналов результаты l измерений длин сторон.

2. Вычисляют средние арифметические значения ($l_{\text{ср.}}$) из результатов l измерений каждой стороны в прямом и обратном направлениях:

$$l_{\text{ср.}} = \frac{l_{\text{прямо}} + l_{\text{обратно}}}{2},$$

и записывают их в графу 4.

3. Находят разности $d = l_{\text{прямо}} - l_{\text{обратно}}$ (графа 5) и их сумму

$$[d] = d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_6.$$

4. Проверяют выполнение условия $|[d]| \leq 0,25 [|d|]$;

$$|[d]| = 27; [|d|] = 35; 0,25 [|d|] = 8,75;$$

Условие не выполнено, значит оценку точности результатов измерений следует выполнять по формулам (73) – (75).

5. Вычисляют величину систематической погрешности разностей d :

$$\theta = \frac{[d]}{n} = \frac{-27}{6} = -4,5 \text{ см.}$$

6. В графу 7 записывают разности $d' = d - \theta$, свободные от систематической погрешности θ .

7. Квадраты разностей d'^2 , их сумму $[d'^2]$ заносят в графу 8, контролируя значение суммы по формуле

$$[d'^2] = [d^2] - \frac{[d]^2}{n} = 307 - \frac{27^2}{6} = 307 - 121,5 = 185,50.$$

8. По формулам (73) – (75) вычисляют средние квадратические погрешности:

- разностей результатов двойных равноточных измерений

$$m_d = \sqrt{\frac{[d'^2]}{n-1}} = \frac{185,50}{5} = \pm 6,1 \text{ см};$$

- результатов отдельных измерений

$$m_l = \frac{m_d}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{[d'^2]}{2(n-1)}} = \frac{6,1}{\sqrt{2}} = \pm 4,3 \text{ см};$$

- средних арифметических значений из результатов двойных равноточных измерений

$$m_{l, \text{ср.}} = \frac{m_l}{\sqrt{2}} = \frac{4,3}{\sqrt{2}} = \pm 3,0 \text{ см}.$$

9. В графе 9 записывают относительные погрешности результатов измерений, вычисляемые по формуле

$$m_{l, \text{ср.}} / l_{\text{ср.}} = 1 : (l_{\text{ср.}} / m_{l, \text{ср.}})$$

Задача 9. В теодолитном ходе равно точно измерено семь горизонтальных углов двумя полуприемами каждый и получены результаты этих измерений $\beta_{R,i}$ и $\beta_{L,i}$, где $\beta_{R,i}$ – значения углов, полученных в первом полуприеме – при положении вертикального круга теодолита справа (КП); $\beta_{L,i}$ – значения углов, полученных во втором полуприеме – при положении вертикального круга теодолита слева (КЛ); $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – номера углов и их число.

Определить средние квадратические погрешности:

m_β – результатов измерений углов в полуприемах;

$m_{\beta, \text{ср.}}$ – средних арифметических значений углов в приемах – по разностям результатов двойных равноточных измерений углов в полуприемах. Решение представлено в таблице 5. Вычисления выполняют в последовательности, указанной для предыдущей задачи.

Таблица 5

Оценка точности результатов измерения горизонтальных углов

| Номер углов | Результаты измерений | | $d_i = \beta_R - \beta_L$ | d_i^2 | Основные формулы и вспомогательные вычисления |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|---|
| | I полуприем β_R | II полуприем β_L | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 179° 56,9' | 179° 56,2' | + 0,6' | 0,36 | 1. Условие: $ [d] \leq 0,25 \cdot [d] $ $1,0' = 0,25 \cdot 4,0'$ 2. $m_\beta = \sqrt{\frac{[d^2]}{2n}} = \sqrt{\frac{2,54}{14}} = \sqrt{0,181}$ 3. $m_{\beta, \text{ср.}} = \frac{m_\beta}{\sqrt{2}} = \pm 0,30'$ |
| 2 | 179 58,1 | 179 58,9 | - 0,8 | 0,64 | |
| 3 | 180 01,2 | 180 00,4 | + 0,8 | 0,64 | |
| 4 | 180 08,5 | 180 08,0 | + 0,5 | 0,25 | |
| 5 | 179 46,9 | 179 47,4 | - 0,5 | 0,25 | |
| 6 | 202 37,8 | 202 38,0 | - 0,2 | 0,04 | |
| 7 | 179° 43,4' | 179° 42,8' | + 0,6' | 0,36 | |
| $m_\beta = \pm 0,43'$ | | $[] = \Sigma$ | + 1,0' | 2,54 | |
| $m_{\beta, \text{ср.}} = \pm 0,30'$ | | $[[d]]$ | + 1,0 | | |
| | | $[d]$ | + 4,0 | | |

1.5 Неравноточные измерения

1.5.1 Общая арифметическая середина. Веса результатов измерений

Пусть имеется физическая величина (угол, отрезок линии, превышение и т.п.), точное (истинное) значение которой равно X . Эта величина измерена равноточно N раз несколькими сериями и получены результаты $l_j^{(i)}$, этих измерений. Здесь $i = 1, 2, 3, \dots, k$ –

номера серий измерений и их число; $j = 1, 2, 3, \dots$, n_i – номера измерений в каждой серии и их число.

Примем, что число измерений n_i в каждой серии неодинаково, т.е.

$$n_1 \neq n_2 \neq n_3 \neq \dots \neq n_k. \quad (88)$$

Обозначим среднюю квадратическую погрешность результатов $l_j^{(i)}$ равноточных измерений через μ . В каждой серии можно определить наиболее точное по вероятности значение результата x_i , как среднее арифметическое из результатов $l_j^{(i)}$ равноточных измерений:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{l_1^{(1)} + l_2^{(1)} + l_3^{(1)} + \dots + l_{n_1}^{(1)}}{n_1}; \\ x_2 &= \frac{l_1^{(2)} + l_2^{(2)} + l_3^{(2)} + \dots + l_{n_2}^{(2)}}{n_2}; \\ &\dots\dots\dots; \\ x_k &= \frac{l_1^{(k)} + l_2^{(k)} + l_3^{(k)} + \dots + l_{n_k}^{(k)}}{n_k}, \end{aligned} \right\} \quad (89)$$

и их средние квадратические погрешности

$$m_1 = \frac{\mu}{\sqrt{n_1}}; m_2 = \frac{\mu}{\sqrt{n_2}}; m_3 = \frac{\mu}{\sqrt{n_3}}; \dots; m_k = \frac{\mu}{\sqrt{n_k}}. \quad (90)$$

Величины x_i - результаты неравноточных измерений, для которых

$$m_1 \neq m_2 \neq m_3 \neq \dots \neq m_k \quad (91)$$

по условию (88). Возникает задача, как по результатам x_i неравноточных измерений найти наиболее точное по вероятности значение измеряемой величины X_0 .

Так как $l_j^{(i)}$ - результаты равноточных измерений, то вероятнейшее значение X_0 из этих результатов равно

$$X_0 = \frac{l_1^{(1)} + l_2^{(1)} + \dots + l_{n_1}^{(1)} + l_1^{(2)} + l_2^{(2)} + \dots + l_{n_2}^{(2)} + \dots + l_1^{(k)} + l_2^{(k)} + \dots + l_{n_k}^{(k)}}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k} \quad (92)$$

В свою очередь,

$$\left. \begin{aligned} l_1^{(1)} + l_2^{(1)} + l_3^{(1)} + \dots + l_{n_1}^{(1)} &= x_1 \cdot n_1; \\ l_1^{(2)} + l_2^{(2)} + l_3^{(2)} + \dots + l_{n_2}^{(2)} &= x_2 \cdot n_2; \\ &\dots\dots\dots; \\ l_1^{(k)} + l_2^{(k)} + l_3^{(k)} + \dots + l_{n_k}^{(k)} &= x_k \cdot n_k; \end{aligned} \right\} \quad (93)$$

С учетом (93) равенство (92) перепишем в виде

$$X_0 = \frac{x_1 \cdot n_1 + x_2 \cdot n_2 + x_3 \cdot n_3 + \dots + x_k \cdot n_k}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k} \quad (94)$$

Обозначив $n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k = N$,

$$(95)$$

получим

$$X_0 = \frac{[x_i \cdot n_i]}{[n_i]} = \frac{[x_i \cdot n_i]}{N}. \quad (96)$$

Из выражения (90) видим, что

$$n_1 = \frac{\mu^2}{m_1^2}; n_2 = \frac{\mu^2}{m_2^2}; \dots; n_k = \frac{\mu^2}{m_k^2}. \quad (97)$$

Подставим значения для n_i в равенства (94), (97):

$$X_0 = \frac{x_1 \frac{\mu^2}{m_1^2} + x_2 \frac{\mu^2}{m_2^2} + \dots + x_k \frac{\mu^2}{m_k^2}}{\frac{\mu^2}{m_1^2} + \frac{\mu^2}{m_2^2} + \dots + \frac{\mu^2}{m_k^2}}. \quad (98)$$

Величины

$$\frac{\mu^2}{m_i^2} = p_i \quad (99)$$

называют *весами* результатов x_i неравноточных измерений.

С учетом (99) выражение (98) примет вид

$$X_0 = \frac{x_1 \cdot p_1 + x_2 \cdot p_2 + \dots + x_k \cdot p_k}{p_1 + p_2 + \dots + p_k} = \frac{[p \cdot x]}{[p]} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i}{\sum_{i=1}^k p_i}. \quad (100)$$

Величину X_0 , вычисляемую по формуле (100) называют *общей арифметической серединой, средним весовым, или средневзвешенным значением* определяемой величины из результатов неравноточных измерений.

Величина общей арифметической середины не изменится, если все веса изменить в одинаковое число раз. Этим свойством следует пользоваться для упрощения вычислений. На практике общую арифметическую середину чаще всего вычисляют по формуле

$$X_0 = x' + \frac{[p\varepsilon]}{[p]}, \quad (101)$$

которая получена из следующих рассуждений.

В ряду результатов x_i неравноточных измерений выберем наименьший по абсолютной величине и примем его в качестве приближенного значения искомой величины, т.е.

$$x' = x_{i, \min}. \quad (102)$$

Образует разности

$$\varepsilon_i = x_i - x'. \quad (103)$$

Умножив обе части этого равенства на соответствующие веса p_i , получим

$$p_i \cdot \varepsilon_i = p_i \cdot x_i - p_i \cdot x'. \quad (104)$$

Найдем сумму уравнений (102) и разделим ее на $[p_i]$

$$\frac{[p_i \cdot \varepsilon_i]}{[p_i]} = \frac{[p_i \cdot x_i]}{[p_i]} - x', \quad (105)$$

Но
$$\frac{[p_i \cdot x_i]}{[p_i]} = X_0,$$

тогда $X_0 = x' + \frac{[p_i \cdot \varepsilon_i]}{[p_i]}$, т.е. получена формула (101).

1.5.2 Средняя квадратическая погрешность единицы веса

На основании формулы (99) можно сделать вывод, что веса результатов измерений – положительные числа, обратно пропорциональные квадратам средних квадратических погрешностей этих результатов.

Пусть в ряду результатов измерений x_i существует такой x_j , вес которого равен единице, т.е. $p_j = 1$.

Тогда

$$p_j = \frac{\mu^2}{m_j^2} \text{ и } \mu^2 = m_j^2; \mu = m_j. \quad (106)$$

Величину $\mu = m_j$ называют *средней квадратической погрешностью единицы веса* или *средней квадратической погрешностью результата измерения*, вес которого равен единице.

Из выражения (99) видно также, что

$$\mu = m_i \sqrt{p_i} \quad (107)$$

или

$$\mu^2 = m_1^2 p_1 = m_2^2 p_2 = \dots = m_k^2 p_k, \quad (108)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_2^2}{m_1^2}, \frac{p_2}{p_3} = \frac{m_3^2}{m_2^2}, \dots, \frac{p_{k-1}}{p_k} = \frac{m_k^2}{m_{k-1}^2}. \quad (109)$$

1.5.3 Средняя квадратическая погрешность и вес общей арифметической середины

Пусть $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – результаты неравноточных измерений; $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ – веса этих результатов.

Тогда

$$X_0 = \frac{[px]}{[p]} = \frac{p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 + \dots + p_n x_n}{p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n} = \frac{p_1}{[p]} x_1 + \frac{p_2}{[p]} x_2 + \frac{p_3}{[p]} x_3 + \dots + \frac{p_n}{[p]} x_n. \quad (110)$$

Обозначим $\frac{p_i}{[p]} = k_i$, где $i = 1, 2, 3, \dots, n$. С учетом обозначения формула (110)

примет вид

$$X_0 = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + \dots + k_n x_n. \quad (111)$$

Согласно с (42) можно записать

$$M_0^2 = m_{x_0}^2 = k_1^2 m_1^2 + k_2^2 m_2^2 + \dots + k_n^2 m_n^2 = \frac{p_1^2}{[p]^2} m_1^2 + \frac{p_2^2}{[p]^2} m_2^2 + \frac{p_3^2}{[p]^2} m_3^2 + \dots + \frac{p_n^2}{[p]^2} m_n^2. \quad (112)$$

Но $p_i \cdot m_i^2 = \mu^2$, тогда

$$M_0^2 = \frac{\mu^2 p_1 + \mu^2 p_2 + \dots + \mu^2 p_n}{[p]^2} = \frac{\mu^2 [p]}{[p]^2} = \frac{\mu^2}{[p]} \quad (113)$$

или

$$M_0 = \frac{\mu}{\sqrt{[p]}}, \quad (114)$$

т.е. *средняя квадратическая погрешность общей арифметической середины равна отношению средней квадратической погрешности единицы веса к корню квадратному из суммы весов результатов измерений.*

На основании формул (99) и (114) имеем

$$P = \frac{\mu^2}{M_0^2} = \frac{\mu^2}{\mu^2/[p]} = [p]. \quad (115)$$

Таким образом, *вес общей арифметической середины равен сумме весов результатов неравноточных измерений, из которых она определена.*

1.5.4 Вычисление средней квадратической погрешности единицы веса

Рассмотрим способы вычисления средней квадратической погрешности единицы веса, применяемые в геодезической практике.

1. Вычисление μ при установлении весов по известным средним квадратическим погрешностям m результатов измерений. Веса результатов измерений в этом случае устанавливают по формуле

$$p_i = \frac{\mu^2}{m_i^2} = \frac{c}{m_i^2}, \quad (116)$$

в которой коэффициент c назначается с таким расчетом, чтобы значения весов p_i было близким к единице. Тогда μ вычисляют из выражения

$$\mu = \sqrt{c}. \quad (117)$$

2. Вычисление μ по известным средним квадратическим погрешностям и весам однородных результатов измерений выполняют по формуле

$$\mu = \sqrt{\frac{m_i^2 p_i}{n}}, \quad (118)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n – число измерений, для которых известны m_i и p_i .

3. Вычисление μ по известным истинным случайным погрешностям Δ_i функций измеренных величин и их весам p_i :

$$\mu = \sqrt{\frac{p_i \Delta_i^2}{n}}. \quad (119)$$

Истинные случайные погрешности функций результатов измерений называют невязками и обозначают:

а) f_β – угловая невязка в замкнутом многоугольнике, вычисляемая по формуле

$$f_\beta = \sum_{i=1}^n \beta_i - 180^\circ (n-2), \quad (120)$$

где n – число внутренних углов многоугольника, β_i – результаты измерений углов;

б) ω – угловая невязка в треугольнике, которую находят из выражения

$$\omega = \sum_{i=1}^3 \beta_i - 180^\circ, \quad (121)$$

где β_i – результаты измерений внутренних углов треугольника;

с) f_x и f_y – невязки в приращениях координат полигонометрических или теодолитных ходов, определяемые по формулам

$$f_x = \sum \Delta x - (X_k - X_n) \text{ и } f_y = \sum \Delta y - (Y_k - Y_n), \quad (122)$$

где Δx и Δy – вычисленные приращения координат; X_k, Y_k и X_n, Y_n – координаты опорных геодезических пунктов в конце и начале хода;

г) f_h – высотная невязка нивелирного хода, значение которой вычисляют по формуле

$$f_h = \sum h - (H_k - H_n), \quad (123)$$

где h – значения средних превышений на станциях; H_k, H_n – высотные отметки реперов в конце и начале нивелирного хода.

4. Вычисление μ по вероятнейшим погрешностям u результатов измерений, т.е. по внутренней сходимости результатов

$$\mu = \sqrt{\frac{p_i u_i^2}{n-1}}, \quad (124)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – номера и число измерений, p_i – веса результатов.

1.5.5 Вычисление весов функций независимых аргументов

Имеем функцию

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (125)$$

и веса аргументов $p_{x_1}, p_{x_2}, p_{x_3}, \dots, p_{x_n}$.

На основании формулы (39) можно написать

$$m_F^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 m_{x_3}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 m_{x_n}^2. \quad (126)$$

Разделим обе части этого равенства на μ^2 :

$$\frac{m_F^2}{\mu^2} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \frac{m_{x_1}^2}{\mu^2} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \frac{m_{x_2}^2}{\mu^2} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 \frac{m_{x_3}^2}{\mu^2} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \frac{m_{x_n}^2}{\mu^2}, \quad (127)$$

и, учитывая, что $p_i = \frac{\mu^2}{m_i^2}$, окончательно запишем

$$\frac{1}{P_F} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \frac{1}{P_{x_1}} + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \frac{1}{P_{x_2}} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \frac{1}{P_{x_n}}. \quad (128)$$

1.5.6 Порядок математической обработки результатов неравноточных измерений

Задача 10. Пусть, для определения высоты грунтового репера №29 (см.рис. 4) от фундаментальных реперов № 23 ,24 и 43 до определяемого репера проложено три нивелирных хода. Требуется по результатам трех неравноточных значений высоты репера №29 получить наиболее точное значение высоты этого репера. Высоты исходных реперов считать безошибочными. Исходные данные и результаты вычислений приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Исходные данные

| Номера ходов | Высоты репера № 29 H_i , м | Число станций в ходах n |
|--------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 403.895 | 4 |
| 2 | 403.883 | 7 |
| 3 | 403.890 | 5 |

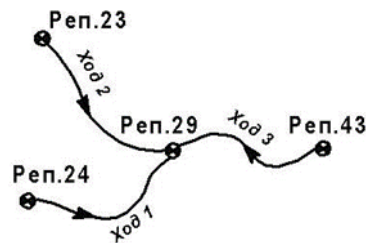


Рис. 4. Схема ходов

Таблица 7

Обработка результатов неравноточных измерений

| Номер ходов i | Высоты репера №29 H_i , м | Число станций n | P | ε мм | $P\varepsilon$, мм | $P\varepsilon^2$ | v , мм | Pv , мм | Pv^2 |
|-----------------|-----------------------------|---|------|------------------|---------------------|------------------|----------|-----------|--------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 403,895 | 4 | 2,50 | +12 | +30,0 | 360,0 | 5 | +12,5 | 62,5 |
| 2 | 403,883 | 7 | 1,43 | 0 | 0,0 | 0,0 | -7 | -10,0 | 70,1 |
| 3 | 403,890 | 5 | 2,00 | +7 | +14,0 | 98,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| H | 403,883 | Σ | 5,93 | +19 | +44,0 | 458,0 | -2 | +2,5 | 132,6 |
| H_0 | 403,8904 | $\mu = \pm 8,1 \text{ мм}; M_0 = \pm 3,3 \text{ мм}; m_h = \pm 2,6 \text{ мм};$ | | | | | | | |
| $H_{ок}$ | 403,890 | $H_{29} = 403,890 \pm 0,033 \text{ м}$ | | | | | | | |
| δ | +0,4 мм | | | | | | | | |

Обработку результатов неравноточных измерений выполняют в следующей последовательности:

1. В графе 1 табл. 7 выписывают из табл. 6 номера нивелирных ходов (см. рис. 4), в графе 2 – высоты репера №29, полученные при проложении нивелирных ходов 1, 2, 3.

2. Выбирают приближенное значение H' высоты репера №29 как наименьшее из H_i , т.е. $H' = H_{i, \min}$, в нашем случае $H' = 403,883$ м.

3. В графу 3 заносят число станций n в каждом нивелирном ходе.

4. В четвертой графе записывают веса P_i результатов измерений для каждого хода, вычисляемые по формуле

$$P_i = \frac{\lambda}{n_i} \quad (129)$$

где $\lambda = 10$ - коэффициент, значение которого выбирают таким образом, чтобы величины весов были близкими к единице.

Формула (129) получена из следующих рассуждений. Считая результаты определения превышения h на каждой j -й станции равноточными, примем в качестве весов p_j этих результатов число λ , т.е.

$$\lambda = p_j = \frac{\mu^2}{m_h^2}, \quad (130)$$

где m_h – средняя квадратическая погрешность определения превышений на станции.

Веса результатов определения высоты репера №29 в каждом i -м нивелирном ходе равны

$$p_j = \frac{\mu^2}{m_i^2}, \quad (131)$$

где $m_i = m_h \sqrt{n_i}$ – средние квадратические погрешности определения высоты репера №29 в каждом нивелирном ходе; n_i – число станций в каждом ходе.

На основании формул (109) можем записать

$$\frac{p_i}{p_h} = \frac{p_i}{\lambda} = \frac{m_h^2}{m_i^2},$$

откуда
$$p_i = \lambda \frac{m_h^2}{m_i^2} = \lambda \frac{m_h^2 n}{m_i^2} = \frac{\lambda}{n}.$$

5. Уклонения $\varepsilon_i = H_i - H'$ заносят в графу 5 табл. 7.

6. В графы 6 и 7 записывают произведения $p_i \varepsilon_i$, $p_i \varepsilon_i^2 = p_i \varepsilon_i \varepsilon_i$ и их суммы.

7. По формуле (101) вычисляют наиболее точное по вероятности значение высоты репера №29:

$$H_0 = H_{29} = H' + \frac{[p\varepsilon]}{[p]} = 403,883 + \frac{44,0}{5,93} = 403,8904 \text{ м.}$$

8. Это значение округляют до 0,001 м. Вычисляют уклонения результатов определения высоты репера №29 по каждому ходу от округленного значения общей арифметической середины, т.е. $v_i = H_i - H_{0,окр.}$, которые записывают в графу 8.

9. В графах 9 и 10 получают произведения $p_i v_i$ и $p_i v_i^2 = p_i v_i v_i$, их суммы с контролем $[pv] = \delta [p]$; $[pv^2] = [p\varepsilon^2] - \frac{[p\varepsilon]^2}{[p]}$, где $\delta = H_0 - H_{0,окр.} = +0,4$ мм – погрешность округления общей арифметической середины.

10. По формулам (124) и (114) вычисляют:

- среднюю квадратическую погрешность единицы веса

$$\mu = \sqrt{\frac{[pv^2]}{N-1}} = \sqrt{\frac{132,6}{2}} = \pm 8,1 \text{ мм};$$

- среднюю квадратическую погрешность общей арифметической середины

$$M_0 = \frac{\mu}{\sqrt{[p]}} = \frac{8,1}{\sqrt{5,93}} = \pm 3,3 \text{ мм},$$

где N – число нивелирных ходов.

11. Среднюю квадратическую погрешность определения превышений на каждой станции находят из выражения

$$m_h = \frac{\mu}{\sqrt{\lambda}} = \frac{8,1}{\sqrt{10}} = \pm 2,6 \text{ мм}.$$

12. По формуле $m_{H_i} = \frac{\mu}{\sqrt{p_i}}$ вычисляют средние квадратические погрешности определения высоты репера №29 по каждому нивелирному ходу

$$m_{H_1} = \frac{8,1}{2,50} = \pm 3,24 \text{ мм}; m_{H_2} = \frac{8,1}{1,43} = \pm 5,66 \text{ мм}; m_{H_3} = \frac{8,1}{2,00} = \pm 4,05 \text{ мм}.$$

13. Окончательное значение высоты репера №29 записывают в виде

$$H_{29} = H_{0,окр.} \pm M_0 = 403,890 \pm 0,033 \text{ м}.$$

