

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА

УПРАВЛІННЯ ТЕРИТОРІЯМИ

Кафедра Інженерної геодезії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІГ

Дем'яненко Р.А. _____

“№ ___” _____ 2023 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР**

Методи створення опорних мереж за допомогою лазерного
трекера

Виконав студент групи ГДм-22

Спеціальність: **193 «Геодезія та
землеустрій»**

Спеціалізація: **193.01 «Геодезія»**

Ткаченко Артем Валентинович
(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Керівник: Адаменко О.В.
(прізвище та ініціали)

доцент, кандидат технічних наук
(вчене звання, науковий ступінь)

Ідентичність підтверджую

Київ 2023

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Факультет: Геоінформаційних систем та управління територіями
Кафедра: Інженерної геодезії

Освітній рівень: «магістр за ОПІ/ОНП»
Спеціальність: Геодезія та землеустрій
Спеціалізація: Інженерна геодезія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

_____ року
„___” _____

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ ВИПУСКНОЇ РОБОТИ НА
ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

_____ **Ткаченко Артем Валентинович** _____

(прізвище, ім'я та по батькові студента)

1. Тема роботи: Методи створення опорних мереж за допомогою лазерного трекера. _____

затверджена наказом ректора КНУБА № _____ від «___» _____ 20__ року

2. Керівник роботи Адаменко Олександр Вікторович

_____ (прізвище, ім'я та по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____

4. Зміст пояснювальної записки за розділами:

Р. 1. Аналіз сучасного стану досліджень створення геодезичних мереж за допомогою лазерних трекерів. _____

Р. 2. Методи дослідження точності геодезичних мереж. _____

Р. 3. Дослідження точності вимірювань лазерного трекера АТ 4102. _____

Р. 4.Аналіз точності побудови геодезичних мереж лазерним трекером АТ 4102.	_____
Р. 5.Висновки.	_____

Зміст

Вступ.....	2
Розділ 1. Аналіз сучасного стану досліджень створення геодезичних мереж за допомогою лазерних трекерів.....	3
1.1 Поняття лазерного трекера.....	3
1.2 Технічні характеристики лазерних трекерів.....	9
Розділ 2. Методи дослідження точності геодезичних мереж.....	17
2.1. Методи розрахунку точності запроєктованих геодезичних мереж.....	17
2.2 Застосування методу Монте-Карло при дослідженні точності вимірювань лазерним трекером	25
Розділ 3. Дослідження точності побудови геодезичних мереж лазерним трекером АТ 4102.....	32
3.1. Проведення досліду 1 .Дослідження оптимальної відстані для вимірювання на станціях.....	32
3.2. Проведення досліду 2.Розміщення точок.....	48
Висновки.....	58
Список використаної літератури.....	60

Вступ

Актуальність теми дослідження полягає в необхідності вдосконалення методів створення опорних мереж для високоточних геодезичних вимірювань. Одним із сучасних і перспективних інструментів для цієї мети є лазерний трекер. У зв'язку з широким застосуванням цього обладнання в різних галузях, від інженерії до геодезії, важливим стає розробка ефективних методів його використання для створення надійних опорних мереж.

Мета дослідження. Головною метою магістерської роботи є аналіз, розробка та вдосконалення методів створення опорних мереж з використанням лазерного трекера Leica AT402. Робота присвячена вивченню можливостей трекера та розробці оптимальних підходів до його застосування.

Завдання дослідження:

- Провести огляд сучасних методів створення опорних мереж та їх обмежень.
- Детально розглянути принцип роботи лазерного трекера та його характеристики.
- Розробити та впровадити методику використання лазерного трекера для створення опорних мереж.
- Здійснити порівняльний аналіз результатів, отриманих за допомогою розроблених методів, з існуючими підходами.

Очікувані результати. Результати дослідження можуть мати практичне застосування в інженерних та наукових областях, де важливо забезпечити високу точність геопросторових даних, дана робота сприятиме розвитку сучасних методів створення опорних мереж та забезпечить нові можливості для отримання точних геодезичних даних.

Розділ 1. Аналіз сучасного стану досліджень створення геодезичних мереж за допомогою лазерних трекерів.

1.1. Поняття лазерного трекера.

Лазерні трекери - це вимірювальні пристрої, в основі яких лежить принцип відстеження відбивача лазерним променем.

Лазерні трекери точно вимірюють великі об'єкти, визначаючи положення оптичної мішені, що знаходиться над об'єктом. Точність лазерного трекера становить приблизно 0,025 мм на відстані кількох метрів.

Коли лазерний промінь, випромінюваний приладом, потрапляє в центр кутового відбивача, він повертається через лінзу приладу на приймальний датчик віддалеміра. Просторові координати відбивача можна визначати в статичному і динамічному режимі. Координати розраховуються з урахуванням двох кутів і відстаней.

В якості вимірювача відстані може використовуватися інтерферометр (IFM) або абсолютний віддалемір (ADM).

Крім того, лазерний трекер може бути оснащений електронним зондом і відеокамерою.

Цей інструмент можна використовувати для таких завдань

- Вимірювання великих кріплень на компонентах обладнання;
- Калібрування верстатів і КВМ;
- наприклад, оцифрування поверхонь.
- Вирівнювання під час складання крила літака.
- Вирівнювання великих верстатів. [1]

Щоб виконати вимірювання, техніки спочатку встановлюють лазерний трекер на штатив, при цьому об'єкт, який потрібно виміряти, повинен бути

чітко видно з точки розташування лазерного трекера. Спеціаліст знімає мішень з основи лазерного трекера і переміщує її до об'єкта, що вимірюється, плавно, щоб лазерний трекер міг слідувати за рухом мішені. Спеціаліст розміщує мішень на об'єкті і запускає вимірювання у вибраній точці. Вимірювання можна імпортувати в різні типи програмного забезпечення для побудови графіків точок і розрахунку відхилень від правильного положення.

Мішені називаються "відбиваючими", оскільки вони відбивають лазерний промінь у тому ж напрямку, звідки він прийшов (в даному випадку назад до лазерного трекера). Найпоширеніший тип мішені називається сферичним рефлектором (SMR), який нагадує шарикопідшипник зі зрізаною дзеркальною поверхнею.[1]

Лазерні трекери вже давно стали портативним вимірювальним інструментом для аерокосмічних, автомобільних та інших великих виробничих компаній. Ці системи застосовуються для контролю на місці, метрологічного вирівнювання та складання, створення прототипів, аерокосмічного обладнання та інструментів, вимірювання нефарбованих ("білих") кузовів транспортних засобів, реінжинірингу та вирівнювання великих деталей і вузлів. Лазерні трекерні системи пропонують переваги з точки зору точності, надійності та довговічності у великомасштабних метрологічних застосуваннях. Основна їхня перевага - портативність. Деякі деталі мають занадто велику вагу, розмір або довжину, щоб їх можна було виміряти на звичайних координатно-вимірювальних машинах (КВМ).

Hexagon T-Probe Solar Reserve у 1995 році вимірювач абсолютної відстані (ADM) у поєднанні з лазерним трекером зробив революцію в його застосуванні. Якщо промінь переривався, оператору більше не потрібно було повертатися до початкової точки, щоб "перезавантажити" прилад. Оператор

міг просто змінити положення променя і продовжити тестування. У ранніх моделях ADM були повільнішими і набагато менш точними, ніж аналогічні інтерферометри. Технології розвиваються дуже швидко, і сьогоденні ADM є більш точними, ніж інтерферометри, з якими їх колись порівнювали. Існують також прилади, які поєднують ADM та інтерферометр в одному вимірювальному приладі, і такі прилади відомі як абсолютні інтерферометри (AIFM).

Лазерні трекари, такі як Leica Geosystems AT901 Absolute Tracker (Hexagon Metrology, North Kingstown, RI), не вимагають від оператора пошуку променя. Камера PowerLock трекара використовує розширювану польову камеру для захоплення відбивача. Це скорочує час перевірки, оскільки оператору потрібно лише перебувати в зоні видимості трекара, щоб зафіксувати промінь на відбивачі.

Лазерні віддалеміри відрізняються за своїми можливостями. Деякі моделі цієї групи також можуть виконувати обчислення, використовувати різні одиниці виміру, зберігати дані вимірювань, мати підсвічування екрану і звуковий супровід під час роботи. Існують також моделі лазерних віддалемірів, які виконують різні складні розрахунки автоматично, що значно спрощує роботу при будівництві капітальних споруд. Вони мають максимальну дальність вимірювання і відрізняються високою надійністю.

Існує два типи цього приладу: імпульсний і фазовий. Принцип роботи імпульсного типу базується на двох компонентах: лазері та детекторі. Промінь світла (лазер) спрямовується на об'єкт, що цікавить, і відстань вимірюється за час, необхідний для його проходження до точки вимірювання. Після фіксації на потрібній точці і передачі інформації лазер

відразу ж вимикається і його робота максимально непомітна. З цієї причини такі моделі зазвичай використовують військові для виконання своїх місій.

Фазовий принцип роботи полягає також у наведенні лазера на віддалений об'єкт. Залежно від відстані частота модельованого променя змінюється і має свою фазу.

Хоча лазерний трекер дуже точний, його здатність вимірювати напрямок прямої видимості обмежена. Якщо немає чіткої прямої видимості, трекер може знадобитися перемістити кілька разів, щоб повністю оглянути певний інструмент або деталь. Крім втрати дорогоцінного часу, переміщення станції також знижує точність вимірювання, оскільки з кожним переміщенням накопичуються кумулятивні помилки. Впровадження портативних вимірювальних приладів стало вирішенням цієї проблеми.

Сферичні відбивачі, також відомі як кутові відбивачі, мають невеликі розміри і часто падають, ламаються або зміщуються. Це може ускладнити їх використання, особливо в складних умовах, коли оператор повинен тримати рейку вільними руками. Діапазон вимірювання також обмежений. При використанні кутового відбивача промінь від лазерного трекера повинен падати на відбивач під кутом не більше $\pm 22^\circ$. При використанні ручних датчиків кут падіння збільшується до ± 45 градусів, що спрощує перевірку і значно підвищує швидкість.

Крім того, набори мішеней, що використовуються разом з кутовими відбивачами, також можуть бути джерелом похибки. Найпоширенішою помилкою є плутанина між метричними та дюймовими вимірами. Наприклад, 25-міліметровий тримач відбивача візуально не відрізняється від тримача відбивача діаметром 1 дюйм (25,4 мм).

Ручний зонд має кілька елементів керування з обох боків пристрою для збору даних 3D-координат і зв'язування їх з вимірювальним програмним забезпеченням. Ці елементи керування заощаджують час, оскільки оператору не потрібно підходити до комп'ютера для введення даних. Це потенційно може заощадити витрати на робочу силу, оскільки для вимірювання потрібна лише одна людина замість двох.

Деякі системи лазерних трекерів дозволяють вводити інформацію дистанційно. Однак при цьому відсутній зворотний зв'язок у реальному часі, який би підтверджував, що перевірка була проведена правильно. Системи дистанційного контролю також незручні, коли доступ до них обмежений.

Раніше єдиним способом сканування деталі за допомогою лазерного трекера було розміщення SMR на поверхні деталі. У програмах, що використовують лазерне сканування, ручний сканер, здатний фіксувати сотні тисяч точок в секунду, приводиться в дію лазерним трекером для зняття великої кількості величезних хмар точок, які є надзвичайно точними. Використовуючи цю технологію, CAD-моделі можна перевіряти дуже швидко, скорочуючи час перевірки з кількох днів до кількох годин.

Якщо абсолютне положення об'єкта в просторі невідоме, то для перевірки деталі може знадобитися спеціальне пристосування. На кожному етапі проектування необхідно змінювати положення джиги, що вимагає значних витрат як грошей, так і часу. Оскільки об'єкт можна розглядати з усіх боків, математична модель може бути створена в програмі і практично зафіксована на місці. Тепер оператор може маніпулювати моделлю у віртуальному просторі, а не створювати новий світильник на фізичному об'єкті. Інженери-проектувальники отримують вигоду від збільшення кількості варіантів продукту за певний цикл складання, широких

можливостей створення прототипів, зниження витрат на матеріали та пришвидшення часу виходу на ринок [6]. Автоматизація роботизованих систем Система Laser Tracker спрощують і дозволяють використовувати недорогих, низькоточних роботів для виконання більш точних завдань.

Кутові відбивачі допомагають Laser Tracker калібрувати промислових роботів, враховуючи довжину ланки, кут повороту, початкове положення суглоба, зміщення осі та параметри жорсткості.

Інший спосіб автоматизації робота - це використання шести ступенів свободи для керування рухом робота в потрібному положенні. Ця функція дозволяє виробникам роботів регулювати положення стяжної планки в меншій кількості позицій під час циклу калібрування. Вона також забезпечує точні координати центральної точки інструменту (ТСП) в режимі реального часу.

Нарешті, ще один спосіб автоматизації промислових роботів - це перевірка дуже великих деталей безпосередньо на верстаті. Найпростіший спосіб зробити це - уявити робота як оператора, що виконує дуже повторювані рухи. Ручний вимірювальний пристрій переміщується над деталлю, яку перевіряє робот, і результати вимірювань записуються лазерним трекером, а не машиною. Це забезпечує точність результатів, засновану на точності трекера, а не менш точного верстата з ЧПУ.

Завдяки низькій вартості технології лазерних трекерів, лазерні трекери менші, легші, швидші і простіші у використанні. Ручні сканери, датчики і системи керування верстатами підвищили гнучкість лазерних трекерів, а кількість можливих застосувань різко зросла. Додаткові функції, такі як робота від батареї та захист від пилу і бризок IP54, дозволили використовувати сучасні лазерні трекери в місцях, про які люди навіть не

здогадувалися. Оскільки попит на цю технологію продовжує зростати, її використання поширилося і на менші робочі місця. Лазерні трекари повинні бути в центрі уваги якомога більшої кількості людей. [2]

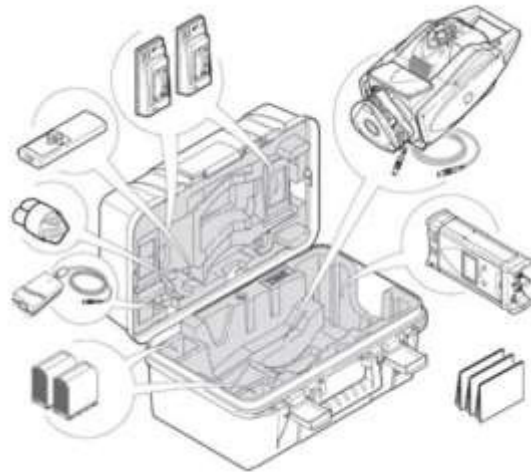
1.2. Технічні характеристики лазерних трекерів Leica.

Абсолютний трекари Leica AT402



У дослідженні ми будемо використовувати лазерний трекари Leica AT402 вироблений в Hexagon MI Leica у Швейцарії.

Його особливість це портативність, мінімальна конфігурація вимірювальної системи, включаючи кейс для транспортування і зберігання, важить менше 15 кг. Розмір кейса дозволяє перевозити систему в багажному відділенні літака, а також в транспортних засобах.



Призначений для роботи в складних умовах, завдяки герметичній конструкції вимірювальної системи відповідно до IP54 (IEC 60529). Лазерні трекери Leica в суворих умовах експлуатації зберігають високу точність вимірювань, їм не заважають навіть бризки охолоджувальної рідини, висока вологість, пил і безпосередня близькість до зварювального та металорізального обладнання.

Leica AT402 Absolute Tracker - це перший лазерний трекер, який може працювати на відкритому повітрі, навіть у вологу погоду.

У 2009 році компанія Leica Geosystems першою в світі ввела в обіг термін PowerLock - технологію на основі технічного зору, яка автоматично виявляє відбивачі і спрямовує на них лазерний промінь. Система гарантує, що промінь точно потрапляє в ціль, навіть якщо ціль рухається. При цьому лазерний промінь спрямовується тільки на відбивач і не впливає на інші об'єкти.

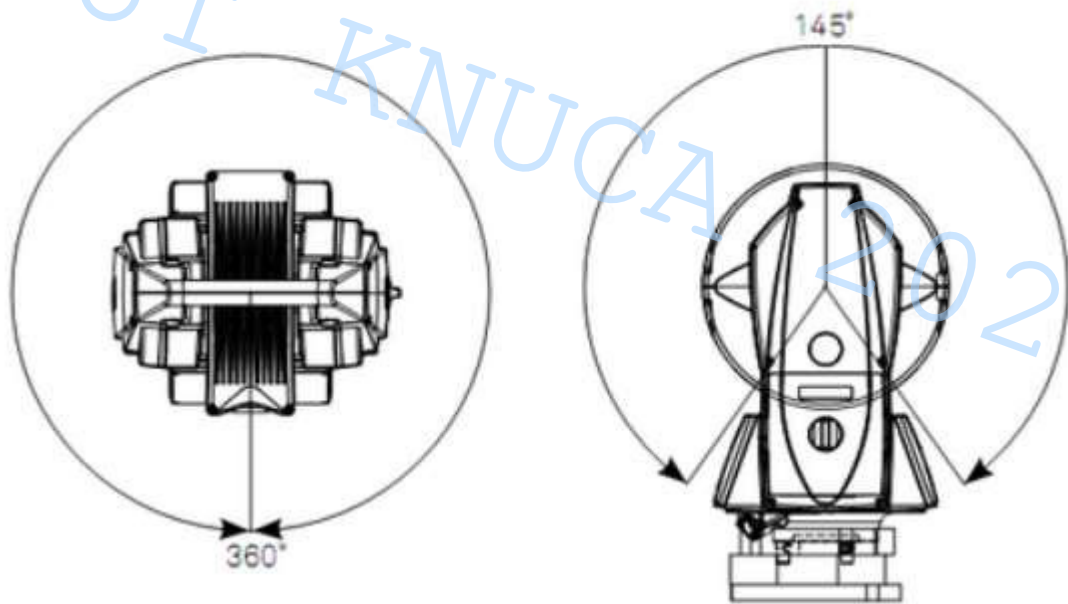
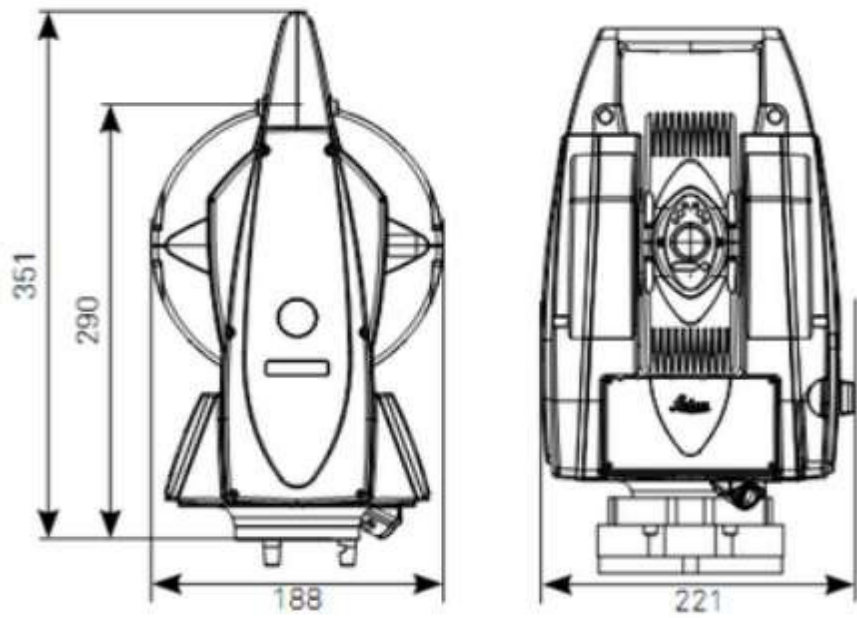
До впровадження цієї технології робота з лазерними трекерами завжди була складною і незрозумілою для операторів. Операторам доводилося витратити додатковий час на набуття спеціального досвіду, щоб ефективно

використовувати трекер, не перериваючи промінь. Використання технології Powerlock значно скорочує час навчання операторів і спрощує роботу з трекером.

Трекера Leica AT402 характеризується бездротовою концепцією. Для автономного живлення вимірювальної системи використовуються дві однакові акумуляторні батареї: одна для живлення трекера, інша для живлення контролера. Працюючи від батарей, трекер може виконувати вимірювання протягом робочої зміни. Коли заряд батареї досягає критичного рівня, батарею можна замінити, з вимкненням або без вимкнення системи. У будь-якому випадку лазерний трекер продовжить виконувати своє завдання без збоїв після заміни батареї.

Вбудований бездротовий інтерфейс передачі даних Wi-Fi усуває необхідність кабельних з'єднань і надає операторам повну свободу.

Трекер Leica AT402 здійснює вимірювання великих габаритних об'єктів. Leica AT402 має горизонтальне поле зору 360° і вертикальне поле зору 290°. Враховуючи відстань до 160 м і високу точність вимірювання, цей лазерний трекер є координатно-вимірювальною машиною з дуже великим діапазоном вимірювання.



Похибка вимірювання ($U_{\text{хуз}}$) визначається як відхилення вимірюваних координат точки від номінальних координат. Похибка вимірювання залежить від відстані між лазерним трекером і точкою вимірювання.

Для абсолютного лазерного трекера Leica AT402 об'ємна похибка становить $\pm 15 \text{ мкм} + 6 \text{ мкм/м}$.

Усі наведені похибки ґрунтуються на вимірюваннях, виконаних за стабільних умов навколишнього середовища з використанням 1,5-дюймового рефлектора з червоним кільцем і швидкістю вимірювання 2 секунди на точку в стандартному режимі. Вимірювання проводилися в лінійному діапазоні від 1,5 до 80 метрів і кутовому діапазоні $\pm 45^\circ$ по вертикалі і 360° по горизонталі.

Розміри та вага

Розміри вимірювального блоку 290 x 221 x 188,.

Маса вимірювального блоку, кг: 7,3,.

Розміри контролера, мм 250 x 112 x 63,.

Маса контролера, кг: 0,8.

Діапазон вимірювання.

Обертання в горизонтальній площині $\pm 360^\circ$,.

Поворот у вертикальній площині $\pm 145^\circ$.

Лінійна дальність, м: 160.

Умови експлуатації

Клас захисту Клас захисту: IP54 (IEC 60529);

Робоча температура ($^\circ\text{C}$): від 0 до $+40^\circ\text{C}$.

Допустима вологість: до 95% (без конденсату);

Допустима висота над рівнем моря (м): від - 700 до + 5500

Характеристики приводу вимірювального блоку.

Прискорення $360^\circ/\text{с}^2$;

Швидкість обертання 180 °/с;.

Кут огляду силового замка: 10°.

Абсолютна кутова характеристика.

Кутова роздільна здатність, кутова сек 0,07;.

Максимальна похибка ± 15 мкм + 6 мкм/м;

Точність повторюваності ± 7 мкм + 3 мкм/м;

Точність регулювання нахилу, кутова секунда ± 1 .

Абсолютні лінійні характеристики

Лінійна роздільна здатність, мкм: 0,1;.

Максимальна похибка, мкм: ± 15 ;

Повторюваність, мкм: ± 5 ;

Лазерне випромінювання

Клас 2 (відповідно до ІЕС 60825-1);

2-е видання (2007-03);

Загальні характеристики

Видошукач: камера 4:3, зображення з ІЧ-підсиленням, кут огляду 10°;

Метеостанція: вологість, температура, барометричний тиск,
температура об'єкта

Пульт дистанційного керування: інфрачервоний

Інтерфейс: дротовий (TCP/IP Cat5), бездротовий (WLAN IEEE
802.11g);

Живлення: вбудована літій-іонна акумуляторна батарея, адаптер
змінного струму, живлення від мережі Ethernet (PoE+).



Лазерний трекер Leica AT402 має також додатковий засіб вимірювання Leica V-probe, що являє собою контактний щуп з бездротовою передачею даних. Завдяки наявності в ньому подовжувача щупа можлива робота в отворах.

Для Leica V-probe властиві такі технічні характеристики:

- Радіус дії 10 м;
- Похибка вимірювання (Uxyz) $\pm 0,2$ мм;
- Час безперервної роботи 6 год.
- Довжина щупа 150 мм;
- Ступінь захисту IP50.

Розглянемо порівняльну таблицю деяких популярних на сьогодні пртативних лазерних трекерів.

Таблиця 1. Порівняння загальних характеристик лазерних трекерів

Назва трекера	Діапазон вимірювань	Точність вимірювання кутів	Точність вимірювання відстаней
FARO Vantage S	до 80 метрів	до 0,0005 градусів	0,015 мм
FARO Vantage E	до 25 метрів	до 0,0007 градусів	0,015 мм
Leica AT901	до 160 м.	0,15 мм + 0,6 мкр	± 0,5 мкм/м
Leica AT402	до 160 метрів	0,015 мм + 0,6 ppm	1 мм + 1.5 ppm.
FARO ION	до 110 м	0,015 мм на 10 м	0,015 мм

Вибір між трекерами залежить від конкретних потреб та вимог завдання. З таблиці бачимо, що лазерний трекер FARO Vantage S має широкий діапазон вимірювань до 80 метрів і висока точність для кутів та відстаней, тому він підходить для завдань, які вимагають великого діапазону вимірювань та високої точності. Щодо лазерного трекера FARO Vantage E, він зручний для менших відстаней, але все ще з високою точністю, його застосовують у ситуаціях, які не вимагають великого діапазону вимірювань, але потребують високої точності.

Лазерні трекери Leica AT901 містять великий діапазон вимірювань та точність для кутів та відстаней, тому підходять для робіт, де важлива висока точність та великий діапазон вимірювань. А Leica AT402 показує велику

точність для кутів та відстаней у діапазоні до 160 метрів, тому його часто виокрестовують для робіт, де необхідна велика точність та середній діапазон вимірювань.

FARO ION зручний для відносно коротких відстаней з високою точністю, а тому підходить для робіт, що потребують високої точності на невеликих відстанях.

Таким чином, Серія Leica Absolute Tracker AT402, AT403 і AT901 пропонує не тільки високопродуктивні, високоточні контактні і безконтактні рішення для вимірювання і сканування, а й інтуїтивно зрозуміле управління вимірюваннями, що скорочує час навчання і експлуатації мобільних координатно-вимірювальних машин. Серія також пропонує гнучкі функції і настроювані робочі параметри дозволяють вибрати найкращий метод для кожного вимірювання без шкоди для якості.

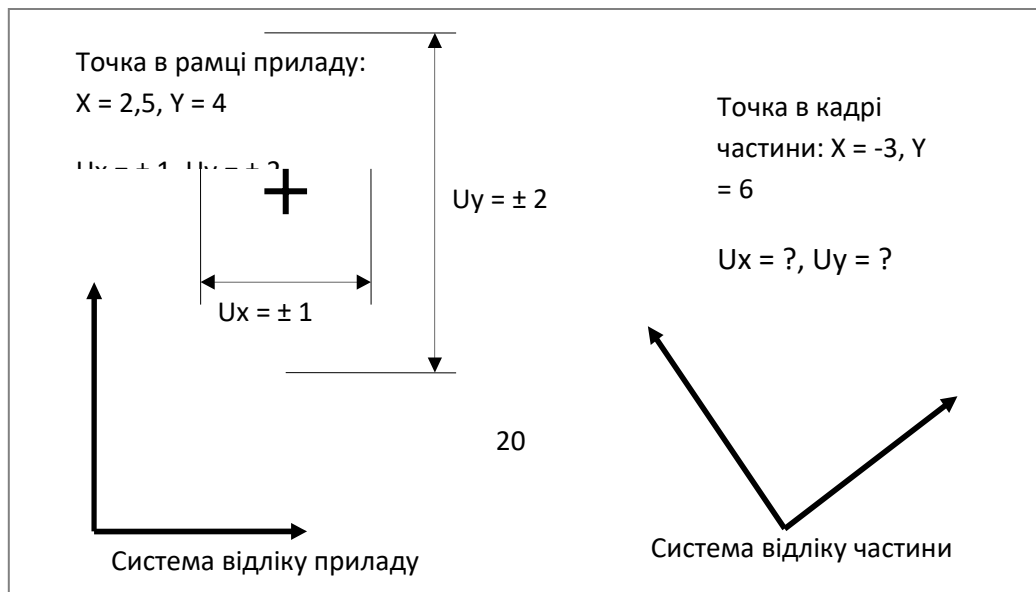
Ці вимірювальні прилади можна використовувати всередині і зовні приміщень, в надзвичайно суворих виробничих умовах з широким діапазоном температур, високою вологістю і забрудненням повітря.

Розділ 2. Методи дослідження точності геодезичних мереж

2.1. Методи розрахунку точності запроєктованих геодезичних мереж

Деякі системи вимірювання надають числові значення СКП, що відповідає вимірюваному значенню. Це числове представлення дійсне лише в межах першого вказаного діапазону. Розглянемо простий випадок, показаний на рисунку 1. Тут виміряні значення координат супроводжуються виразом СКП. Обидва значення відносяться до системи відліку вимірювального приладу. Однак, якщо користувач довільно розташував інструмент відносно деталі, СКП системи відліку інструменту не є корисною. Замість цього оператора цікавлять значення координат і СКП, виражені в системі відліку деталі. Векторні напрямки можуть бути відображені від інструменту до координат деталі, але користувач все одно не може визначити СКП координат деталі. Це пов'язано з тим, що вирази СКП осей інструменту не надають достатньої інформації про справжню геометрію СКП.

Рисунок 1. Заява числової невизначеності осі координат



Коли кілька систем вимірювання координат використовуються разом у метрологічній мережі, вони зазвичай прив'язуються шляхом вимірювання спільної опорної точки.

Крім того, там, де потрібна висока точність, зазвичай використовують кілька вимірювальних систем для вимірювання однієї і тієї ж точки. Така надмірність використовується для зменшення СКП вимірювання.

Як в задачі вимірювання контрольної точки, так і в задачі резервного вимірювання, точка в просторі вимірюється декількома вимірювальними приладами. Оскільки кожен прилад має похибку, пов'язану з вимірюванням координат, тепер є кілька незалежних значень похибки для точки. Яке значення слід використовувати для обчислення положення точки і вираження її СКП.

Відповіді на ці питання варіюються від процесу до процесу, але в багатьох випадках слід використовувати всі значення вимірювань та їх СКП. Враховуючи цю ситуацію, СКП слід об'єднати таким чином, щоб отримати правильну СКП для об'єднаного результату вимірювання.

Еліпсоїди часто використовують як концептуальне представлення СКП координати. Зазвичай ці еліпсоїди орієнтують так, щоб головні осі відповідали осям координат. Однак у деяких випадках їх також використовують в орієнтації, яка збігається з профілем СКП вимірювального приладу. У будь-якому випадку, геометричні представлення, такі як еліпсоїди, є привабливим способом представлення СКП. Такі об'єкти можна зіставити між системами координат, легко описати користувачеві і легко вивести з характеристик засобу вимірювальної техніки. Однак таке представлення не є ідеальним для комбінування СКП: коли два еліпсоїди

об'єднуються, результуюча фігура часто не є еліпсоїдом, а має більш складну форму.

Ця форма не може бути точно представлена еліпсоїдом. Можна визначити обмежений еліпсоїд об'єднаної множини, але це призведе до додаткових наближень у процесі. Крім того, еліпсоїд не містить інформації про ймовірність (або щільність) поля СКП, тому ця важлива інформація втрачається при використанні еліпсоїдного представлення.

Кінцевим результатом або артефактом комплексного аналізу СКП має бути графічне та числове представлення СКП. Ці результати мають бути легко представлені користувачам вимірювальної системи та замовникам вимірювань. Отже, це представлення має передавати непевність інтуїтивно зрозумілим способом. Інакше результати будуть неправильно зрозумілі або проігноровані. З цієї причини більшість представлень, що використовуються в сучасних системах, повідомляють користувачеві СКП повної координати у вигляді одного числа, часто як функцію відстані від початку координат вимірювального приладу (наприклад, частин на мільйон). Таке сферичне представлення легко зрозуміти. Однак одна з причин, чому його легко зрозуміти, полягає в тому, що воно ігнорує геометрію справжньої СКП засобу вимірювальної техніки. Потрібен зрозумілий компроміс,

Крім того, оскільки інформація про СКП може (і повинна) бути використана під час проектування процесу вимірювання, поле СКП повинно надавати інформацію, яка допомагає проектувальнику мінімізувати СКП. Якщо СКП подано у корисній формі, її можна легко інтегрувати в моделювання вимірювального завдання та загальний аналіз похибки. Це допоможе розробникам визначити можливості процесу, вимоги до фіксації

деталі та багато інших факторів проектування процесу.

Обчислювальні технології швидко розвиваються. Це означає, що рішення, які є повільними, але прийнятними на сьогоднішніх обчислювальних платформах, будуть працювати з невеликим навантаженням або взагалі без нього на завтрашніх комп'ютерах. У минулому чисельні та ітераційні методи уникали використовувати в багатьох процесах через обмеження обчислювальних потужностей. Ці методи мають вигідні з точки зору гнучкості та масштабованості, частково через те, що комп'ютери стали швидшими.

Однак важливо розробити опис СКП, який можна виконати на сучасному комп'ютерному обладнанні та скористатися перевагами швидших платформ. З практичної точки зору, аналіз СКП складних вимірювальних завдань слід виконувати після проведення всіх вимірювань, як частину процесу звітування про роботу оператора. Оскільки компанії-виробники продовжують наполягати на застосуванні даних вимірювань в польових умовах, поза межами вимірювальної лабораторії, аналіз СКП також повинен слідувати цій тенденції. Неприйнятно, що аналіз СКП вимагає багатогодинного аналізу на потужних лабораторних робочих станціях.

У багатьох випадках фактичні точки, виміряні вимірювальним приладом, є лише проміжними результатами процесу вимірювання. Це пов'язано з тим, що ці точки вимірювання часто використовуються для підгонки геометрії, побудови поверхонь за допомогою зворотного інжинірингу, а також для оцінки геометричних розмірів і вимог до допусків. Тому представлення поля СКП повинно бути застосовним до цих процесів

аналізу. Без цієї функціональності СКП фактичних результатів вимірювань була б невідомою.

Беручи до уваги вищезгадані вимоги та наявні в даний час представлення СКП, для цілей цього дослідження було розроблено нове представлення - метод дискретних груп точок. У цьому методі поле СКП представлено серією дискретних точок, що представляють модельовану СКП, пов'язану з вимірювальним пристроєм. Ці групи дискретних точок створюються шляхом моделювання впливу похибок обладнання на координати вимірювання. Це моделювання здійснюється шляхом введення СКП в параметри обладнання та визначення їх впливу на вимірювання.

Зосередимося на хмарному представленні та його перевагах перед іншими методами.

На рисунку 2 зображено кілька полів невизначеності для звичайного портативного вимірювання лазерного трекера. Поля СКП масштабуються для видимості. Ці хмари мають сплющену форму, оскільки компонент вимірювання відстані є набагато точнішим, ніж компонент вимірювання кута. Також зауважимо, що в міру того, як точки віддаляються від приладу, хмари розширюються, оскільки кутова невизначеність зростає.

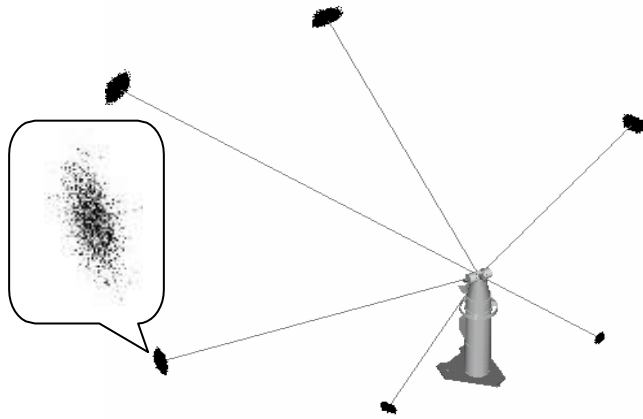


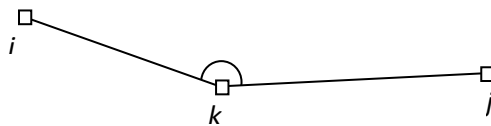
Рисунок2. Поля СКП хмари дискретних точок для лазерного трекера

Розрахунок точності запроектованої опорної геодезичної мережі параметричним способом МНК

Визначення СКП лінійно-кутової мережі, як і будь-якої іншої геодезичної мережі строгим методом, виконується параметричним способом методу найменших квадратів (МНК). В сучасній геодезичній практиці такі обчислення виконують в спеціалізований програмних комплексах на ПК.

В загальному випадку, попередній розрахунок геодезичної мережі строгим способом виконують в наступній послідовності:

1. Складають матрицю коефіцієнтів рівнянь поправок A для всіх вимірних напрямків і відстаней мережі.



Загальний вигляд рівнянь поправок для всіх вимірених кутів у мережі:

$$(a_{kj} - a_{ki})\delta x_k + (b_{kj} - b_{ki})\delta y_k + a_{jk}\delta x_j + b_{jk}\delta y_j - a_{ik}\delta x_i - b_{ik}\delta y_i + l_{ij}^k = v_{ij}^k$$

Коефіцієнти рівнянь поправок визначають за формулами:

$$a_{ij} = -\frac{\sin \alpha_{ij}^0}{S_{ij}^0}; \quad b_{ij} = \frac{\cos \alpha_{ij}^0}{S_{ij}^0};$$

Загальний вигляд рівнянь поправок для всіх вимірених відстаней:

$$a_{ki}\delta x_i + b_{ki}\delta y_i - a_{ki}\delta x_k - b_{ki}\delta y_k + l_{ki} = v_{ki}$$

Коефіцієнти рівнянь поправок визначають за формулами:

$$a_{ki} = \cos \alpha_{ki}; \quad b_{ki} = \sin \alpha_{ki}$$

Вільні члени рівнянь поправок визначають через поперечні та поздовжні зміщення за нормованими похибками вимірювань кутів і відстаней вибраним геодезичним приладом. Для кутів – поперечний зсув:

$$l_i = \frac{m_\beta}{\rho} S_i;$$

Для відстаней – поздовжній зсув:

$$l_i = a + b p p t = (a + b \cdot S [км]) мм,$$

де a , b - похибки віддалеміра прилада,

m_β - скп вимірювань кутів прилада,

S - довжина лінії.

2. Складають матрицю ваг для всіх вимірних кутів і відстаней мережі:

Для кутів:

$$P = 1;$$

Для відстаней:

$$P = \frac{m_{\beta}^2}{m_S^2}$$

3. Складають матрицю N коефіцієнтів нормальних рівнянь для мережі:

$$N = A^T P A$$

де A^T - транспонована по відношенню до A матриця.

4. Знаходять обернену до матриці нормальних рівнянь матрицю вагових коефіцієнтів Q :

$$N^{-1} = Q = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1m} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{m1} & Q_{m2} & \dots & Q_{mm} \end{pmatrix}$$

5. Помноживши обернену матрицю на дисперсію одиниці ваги, отримаємо кореляційну матрицю похибок координат пунктів мережі

$$K_X = \mu^2 Q,$$

де μ - похибка одиниці ваги

$$K_X = \begin{bmatrix} m_{x_1}^2 & k_{x_1 y_1} & k_{x_1 y_2} & \dots & k_{x_1 y_n} \\ k_{x_1 y_1} & m_{y_1}^2 & k_{x_2 y_1} & \dots & k_{y_1 y_n} \\ k_{x_1 y_2} & k_{x_2 y_1} & m_{x_2}^2 & \dots & k_{x_2 y_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{x_1 y_n} & k_{y_1 y_n} & k_{x_2 y_n} & \dots & m_{y_n}^2 \end{bmatrix}$$

де m_{x_i} та m_{y_i} – середні квадратичні похибки абсциси та ординати i -го пункту;

$k_{x_i y_j}$ та $k_{x_i x_j}$ – відповідні кореляційні моменти;

n – кількість пунктів мережі.

Або для кожного пункту окремо:

$$m_F = \mu \sqrt{\frac{1}{P_F}}$$

де m_F – середня квадратична похибка пункту мережі; μ - похибка одиниці ваги; $1/P_F = Q_F$ - обернена вага оцінюваного елемента (функції).

Під час попереднього розрахунку точності мережі, наближені значення вимірних величин зазвичай вираховують по значенням наближених координат пунктів, знятих з картографічних матеріалів.

2.2. Застосування методу Монте-Карло при дослідженні точності вимірювань лазерним трекером

До розвитку методів Монте-Карло пробні випробування розуміли як детерміновану проблему, а для оцінки СКП моделювання використовували статистичну вибірку. Моделювання методом Монте-Карло змінило цей підхід до вирішення проблеми, використовуючи детерміновані ймовірнісні аналогії.

Першими, хто запропонував такий метод, були Енріко Фермі в 1930-х роках і Станіслав Улам в 1946 році. Пізніше Улам зв'язався з Джоном фон Нейманом, який працював над цим методом.

Фізики з Лос-Аламоської наукової лабораторії досліджували захист від радіації та відстань, яку нейтрони проходять через різні матеріали. Враховуючи величезний обсяг необхідних даних, таких як середня відстань, яку нейтрон проходить через речовину, перш ніж влучити в ядро, і скільки енергії нейтрон повинен передати, щоб влучити в ядро, цю проблему не можна було вирішити за допомогою аналітичних розрахунків.

Джон фон Нейман і Станіслав Улам запропонували вирішити цю проблему шляхом моделювання експерименту на комп'ютері за допомогою випадку. Оскільки їхня робота була засекреченою, вона мала отримати кодову назву. Фон Нейман обрав назву «Монте-Карло».

Ніколас Константін Метрополіс також працював над методом Монте-Карло.

Метод Монте-Карло - це група чисельних методів для вивчення випадкових процесів. Його суть полягає в наступному: процес описується математичною моделлю з використанням генератора випадкових величин,

модель багато разів обчислюється, на основі отриманих даних обчислюються ймовірнісні характеристики розглянутого процесу. Наприклад, щоб дізнатися методом Монте-Карло, яке в середньому буде відстань між двома випадковими точками в колі, потрібно взяти координати великої кількості випадкових пар точок в межах заданого кола, для кожної пари обчислити відстань, а потім для них порахувати середнє арифметичне.

Не існує єдиного методу Монте-Карло. Однак ці підходи використовують один основний шаблон:

1. Визначити допустиму область вхідних даних.
2. Випадкова генерація вхідних даних з вище визначеної області з використанням заданого розподілу ймовірностей.
3. Виконати детерміновані обчислення над вхідними даними.
4. Підсумуйте проміжні результати окремих обчислень в кінцевий результат.

Використання методів Монте-Карло вимагає великої кількості випадкових чисел, і їх застосування стимулювало розробку багатьох генераторів псевдовипадкових чисел, які можна використовувати набагато швидше, ніж таблиці випадкових чисел, які раніше використовувалися для статистичної вибірки.

Полярний метод - це один з методів Монте-Карло, який використовується для обчислення інтегралів. Він полягає в тому, що випадкові точки генеруються в полярних координатах, а не в прямокутних, що дозволяє зменшити кількість випадкових точок, необхідних для досягнення заданої точності.

Полярна система координат — двовимірна система координат, в якій кожна точка на площині визначається двома числами — кутом та відстанню. Полярна система координат особливо корисна у випадках, коли відношення між точками найпростіше зобразити у вигляді відстаней та кутів; в більш поширеній, Декартовій, або прямокутній системі координат, такі відношення можна встановити лише шляхом застосування тригонометричних рівнянь.

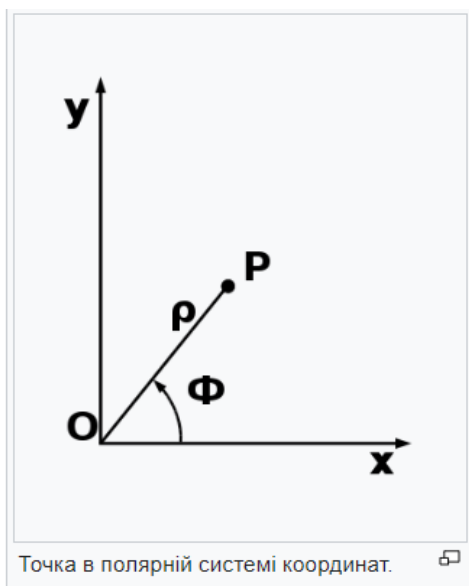
Полярна система координат задається променем, який називають нульовим або полярною віссю. Точка, з якої виходить цей промінь називається початком координат або полюсом. Будь-яка інша точка на площині визначається двома полярними координатами: радіальною та кутовою. Радіальна координата (зазвичай позначається r) відповідає відстані від точки до початку координат. Кутова координата, що також зветься полярним кутом або азимутом (позначається φ) і дорівнює куту між полярною віссю та напрямком на точку.

Визначена таким чином радіальна координата може набувати значення від нуля до нескінченості, а кутова координата змінюється в межах від 0° до 360° . Однак, для зручності діапазон значень азимуту можна розширити за межі повного кута, а також дозволити йому набувати від'ємних значень, що відповідає повороту за годинниковою стрілкою.



Кожна точка в полярній системі координат може бути визначена двома полярними координатами, що зазвичай мають назву r (радіальна координата) та φ (кутова координата, полярний кут, азимут, інколи пишуть θ або t). Координата r відповідає відстані до полюса, а координата φ дорівнює куту відкладеному проти годинникового напрямку від променя, який відповідає 0° (інколи називається полярною віссю).

Наприклад, точка з координатами $(3, 60^\circ)$ виглядатиме на графіку як точка на промені, який лежить під кутом 60° до полярної осі, на відстані 3 одиниць від полюсу. Точка з координатами $(-3, 240^\circ)$ буде намальована на тому ж місці, оскільки від'ємна відстань зображається в додатну в протилежному напрямі (на 180°).



Однією з важливих особливостей полярної системи координат є те, що одна й та сама точка може бути представлена нескінченною кількістю способів. Це відбувається тому, що для визначення азимута точки потрібно повернути полярну вісь таким чином, щоб він вказував на точку. Але напрям на точку не зміниться, якщо здійснити довільну кількість додаткових повних обертів. У загальному випадку точка (r, φ) може бути представлена у вигляді $(r, \varphi \pm n \times 360^\circ)$ або $(-r, \varphi \pm (2n + 1)180^\circ)$, де n — довільне ціле число.

Для позначення полюса використовують координати $(0, \varphi)$. Незалежно від координати φ точка з нульовою відстанню від полюса завжди перебуватиме на ньому.[11] Для отримання однозначних координат точки, зазвичай обмежують значення відстані невід'ємними значеннями $r \geq 0$ а кут φ — інтервалами $[0, 360^\circ)$ або $(-180^\circ, 180^\circ]$ (у радіанах — $[0, 2\pi)$ або $(-\pi, \pi]$).[9]

Кути в полярних координатах задаються або в градусах, або в радіанах, при цьому $2\pi \text{ rad} = 360^\circ$. Вибір, зазвичай, залежить від галузі застосування. У навігації традиційно застосовують градуси, у той час як у деяких галузях фізики, та майже в усіх розділах математики застосовують радіани.[10]

Для обчислення полярного кута не досить знати відношення y до x , а ще й додатково знаки одного з цих чисел, багато сучасних мов програмування мають серед своїх функцій окрім функції atan , яка визначає арктангенс числа, ще й додаткову функцію atan2 , яка має окремі аргументи для чисельника та знаменника. У мовах програмування, що підтримують необов'язкові аргументи (наприклад, у Common Lisp), функція atan може отримувати значення координати x .

Завдяки радіальній природі полярної системи координат, деякі криві можуть бути досить просто описані полярним рівнянням, тоді як рівняння в декартовій системі координат були б набагато складнішими. Серед найвідоміших кривих можна назвати полярну троянду, спіраль Архімеда, лемніскату, равлик Паскаля та кардіоїду.

Полярна система координат двовимірна і тому може застосовуватись лише в тих випадках, коли місце знаходження точки визначається на площині, або для випадку однорідності властивостей системи в третьому вимірі, наприклад, при розгляді течії в круглій трубі. Найкращим контекстом застосування полярних координат є випадки, що сильно пов'язані з напрямом та відстанню від деякого центру. Наприклад, в наведених вище прикладах видно, що простих рівнянь в полярних координатах достатньо для визначення таких кривих як спіраль Архімеда, рівняння яких в декартовій системі координат набагато складніше. Крім того, багато фізичних систем — таких, що містять тіла, що рухаються навколо центру, або явища, що розповсюджуються з деякого центру — набагато простіше моделювати в полярних координатах. Причиною створення полярної системи координат було дослідження орбітального руху та руху по колу.

Полярну систему координат часто застосовують у навігації, оскільки пункт призначення можна задати як відстань та напрям руху від відправної точки. Наприклад, в авіації, для навігації застосовують трохи змінену версію полярних координат. У цій системі, що зазвичай використовується для навігації, промінь 0° називають напрямком 360, а кути відраховуються в напрямку за годинниковою стрілкою. Напрямок 360 відповідає напрямку на північний магнітний полюс, а напрями 90, 180, та 270 відповідають магнітним сходу, заходу та півдню. Так, літак, що летить 5 морських миль на схід можна описати як літак, що летить 5 одиниць в напрямку 90 (центр керування польотами назве його найне-зіро).

Розділ 3. Дослідження точності побудови геодезичних мереж лазерним трекером АТ 4102.

3.1. Дослід 1: Визначення Оптимальної Відстані для Вимірювань на Станції

Лазерні трекери в геодезії є невід'ємною складовою для здійснення точних вимірювань та побудови геодезичних мереж. Проведення досліджень точності з використанням лазерного трекера АТ 4102, включала кілька ключових етапів та процесів.

Метою першого дослідження було визначення оптимальної відстані для розташування опорних точок геодезичної мережі при вимірюванні технологічного обладнання.

Ми вирішили дослідити точність прив'язки лазерним трекером при розташуванні опорних точок біля технологічного обладнання.

Наступним етапом було встановлення контрольних точок К1, К2 та К3.

На кожній контрольній точці встановили точки цілі, які і вимірювалися лазерним трекером.

Дальше ми провели захоплення та запис даних з точок цілі. Отримані дані записали у звіт для подальшого аналізу.

Нижче наведені фото процесу дослідження.

Технологічне обладнання ми вирішили змодельовати через встановлення 4 нерухомих цілей – К1, К2, К3 та К4. Додатково нами було встановлено три опорних цілей О1, О2 та О3, які моделювали положення пунктів опорної геодезичної мережі. На першій станції ми визначали координати всіх контрольних та опорних точок. Перед вимірюванням другої та наступних станцій ми зміщували довільним чином трекер. Через вимірювання опорних цілей О1, О2 та О3 ми визначали координати та орієнтування другої та наступних станцій, після чого виконували вимірювання контрольних точок. Теоретично, у випадку відсутності похибок вимірювань, значення координат контрольних точок на першій та наступних станціях мають співпадати. Проте внаслідок дії похибок вимірювань ми отримуємо деякі відмінності у координатах контрольних точок. За величинами цих відхилень ми можемо оцінити точність прив'язування трекера по опорним цілям. Всі обчислення по прив'язці станцій трекера ми виконували у спеціалізованому програмному комплексі Spetial Analyzer.

У першому досліді ми визначали вплив відстані до опорних цілей на точність прив'язування станцій трекера. Нами було вибрано три конфігурації відстаней від трекера до опорних точок:

1. Встановлення точок опорної мережі біля технологічного обладнання, або безпосередньо на ньому;

2. Встановлення точок опорної мережі на відстані 5-10 м від технологічного обладнання. На таких відстанях встановлювався і трекер;

3. Встановлення точок опорної геодезичної мережі на відстані 10-20 м від технологічного обладнання. На таких відстанях зазвичай встановлюють точки опорної геодезичної мережі при виконанні геодезичних робіт за допомогою електронного тахеометра. Ці відстані зазвичай відповідають відстанню до стін та несучих конструкцій споруди де встановлюється технологічне обладнання.

Для виконання дослідів трекер розташовували таким чином щоб було безперепонно зняти координати контрольних та опорних точок. Спочатку на одній станції виміряли три опорні точки і перевірили їх точками перевірки які розташовані на плиті

Після того як визначили координати з початкової станції стояння трекера, ми змістили прилад на 30-80 см, для контролю та перевірки координат (зміщували тільки для першого досліді). Виконувати вимірювання та аналізувати дані допоміг Spetial Analyzer - програмне забезпечення для метрології. За допомогою цього ПЗ ми мали змогу зручно виконувати вимірювання. Вбудований модуль дозволяє вираховувати координати станцій.

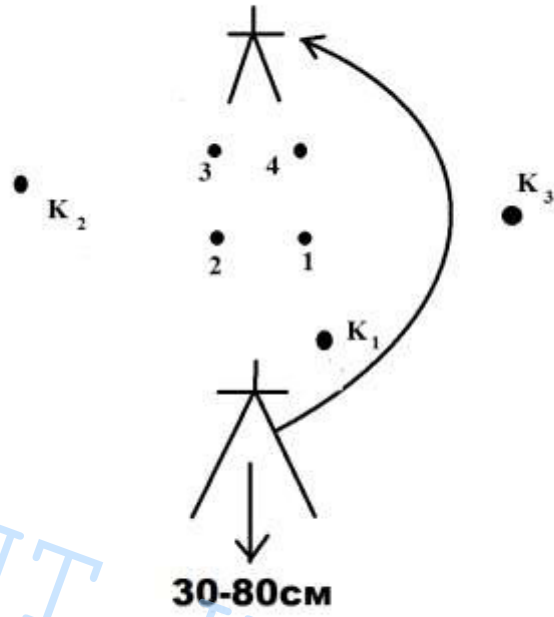


Схема 1. Виконання досліду «коротких відстаней»



Рисунок 1.Налаштування приладу та виконання дослідів

Ми встановили нерухому плиту, яка моделює технологічне обладнання.
Метою нашого дослідження було визначення точності прив'язки трекером

при різних відстанях між трекером і точками прив'язки. Отже, між трекером та точками прив'язки мали 3 опорні точки (К1, К2 та К3) та 4 точки для перевірки. Станцію 1 вибрали як еталон, саме на ній визначали координати 4 точок

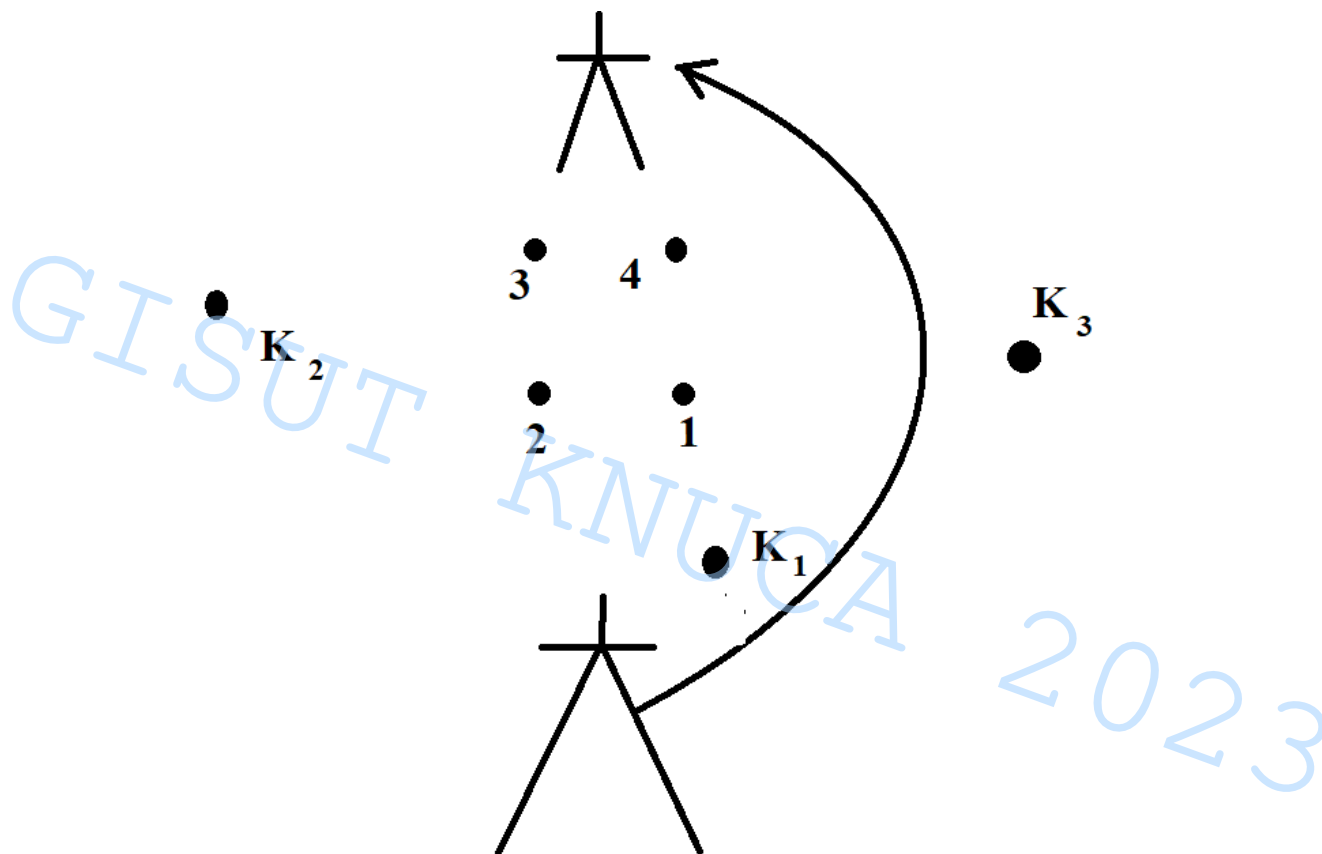


Рисунок 2 .Визначення координат на коротких відстанях
Дослід 1.Короткі відстані

Таблиця 2. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-2089,803	3130,934	-674,737
	2	-2197,501	3066,614	-674,728
	3	-2239,562	3137,090	-674,969
	4	-2131,630	3201,114	-675,014
Станція 2	1	-1824,11	3537,97	-674,730
	2	-1932,78	3475,19	-674,634
	3	-1973,81	3546,29	-674,971
	4	-1864,97	3608,69	-675,022
Станція 3	1	-1824,089	3537,895	-674,976
	2	-1932,726	3475,172	-674,969
	3	-1973,756	3546,249	-675,208
Станція 3	4	-1864,908	3608,6696	-675,249

Станція 4	1	-2089,748	3130,926	-674,743
	2	-2197,457	3066,631	-674,737
	3	-2239,533	3137,073	-674,974
	4	-2131,590	3201,126	-675,024
Станція 5	1	-1824,078	3537,902	-674,988
	2	-1932,734	3475,186	-674,977
	3	-1973,786	3546,256	-675,215
	4	-1864,456	3608,960	-675,256
Станція 6	1	-2089,755	3130,966	-674,754
	2	-2197,488	3066,643	-674,742
	3	-2239,545	3137,097	-674,980
	4	-2131,597	3201,131	-675,028

Δx	Δy	Δz
-0,05	0,01	-0,01
-0,04	-0,02	-0,09
-0,03	0,02	0,00
-0,04	-0,01	0,01
-0,02	0,07	0,03
-0,05	0,02	0,04
-0,05	0,04	0,04
-0,06	0,02	0,02
-0,05	-0,03	0,02
-0,01	-0,03	0,01
-0,02	-0,01	0,01
-0,03	-0,02	0,01
-0,03	0,07	0,02
-0,05	0,00	0,02
-0,02	0,03	0,02
-0,03	-0,02	0,02

Таблиця 3. Визначення СКП вимірювань координат точок.

Похибки				V
Δx^2	0,022	СКП	0,0449	0,040
Δy^2	0,029	СКП	0,0374	
Δz^2	0,018	СКП	0,0213	

$$m = \sqrt{\sum \Delta_i^2 / n}$$

- формула СКП.

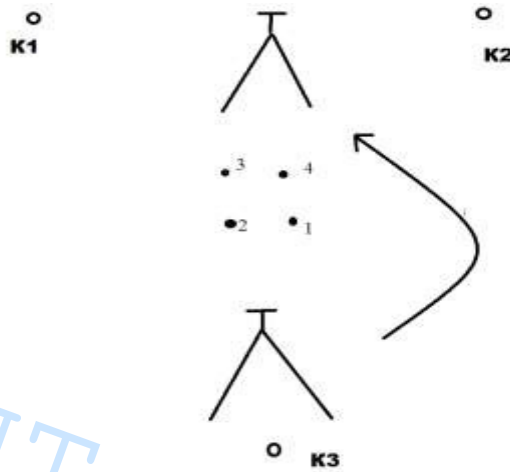


Рисунок 3.Визначення координат на великих відстанях

Таблиця 4. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-1786,952	-2321,633	-996,172
	2	-1669,137	-2364,735	-996,169
	3	-1697,335	-2441,803	-996,412
	4	-1815,068	-2398,373	-996,461
	1	-1786,880	-2321,649	-996,198
	2	-1669,084	-2364,742	-996,194

Станція 2	3	-1697,275	-2441,816	-996,429
	4	-1815,018	-2398,384	-996,475
Станція 3	1	-2387,293	996,530	-995,458
	2	-2371,789	1121,003	-995,450
	3	-2290,336	1110,859	-995,696
	4	-2306,202	986,362	-995,730
Станція 4	1	-2387,308	996,491	-995,431
	2	-2371,798	1120,964	-995,457
	3	-2290,376	1110,825	-995,700
	4	-2306,206	986,325	-995,719
Станція 5	1	-1786,963	-2321,638	-996,175
	2	-1669,142	-2364,742	-996,172
	3	-1697,339	-2441,808	-996,414
	4	-1815,071	-2398,375	-996,464
Станція 6	1	-1786,885	-2321,651	-996,200
	2	-1669,089	-2364,752	- 996,196
	3	-1697,276	-2441,818	-996,431
	4	-1815,021	-2398,367	-996,479

Δx	Δy	Δz
-0,03	0,03	-0,02
-0,07	-0,03	-0,02
-0,04	0,04	0,02
-0,03	-0,03	0,02
-0,03	0,07	0,03
-0,04	0,06	0,03
-0,04	0,06	0,02
-0,05	0,05	0,02
-0,04	-0,04	0,02
-0,03	-0,04	0,04
-0,03	-0,02	0,02
-0,04	-0,03	0,04
-0,04	0,06	0,03
-0,02	0,00	0,04
-0,02	0,04	0,03
-0,04	-0,03	0,02

Таблиця 5. Визначення СКП вимірювань координат точок.

Похибки				V
Δx^2	0,034	СКП	0,0446	0,048
Δy^2	0,027	СКП	0,0501	
Δz^2	0,021	СКП	0,0393	

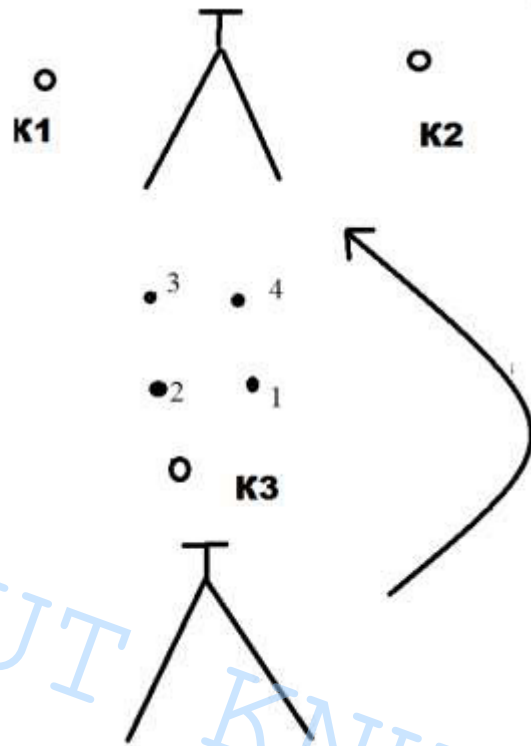


Рисунок 4. Вимірювання координат на середніх відстанях

Таблиця 6. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-1786,952	-2321,633	-996,172
	2	-1669,137	-2364,735	-996,169
	3	-1697,335	-2441,803	-996,412
	4	-1815,068	-2398,373	-996,461
	1	-1786,880	-2321,649	-996,198

Станція 2	2	-1669,084	-2364,742	- 996,194
	3	-1697,275	-2441,816	-996,429
	4	-1815,018	-2398,384	-996,475
Станція 3	1	-2387,293	996,530	-995,458
	2	-2371,789	1121,003	-995,450
	3	-2290,336	1110,859	-995,696
	4	-2306,202	986,362	-995,730
Станція 4	1	-2387,308	996,491	-995,431
	2	-2371,798	1120,964	-995,457
	3	-2290,376	1110,825	-995,700
	4	-2306,206	986,325	-995,719
Станція 5	1	-1786,963	-2321,638	-996,175
	2	-1669,142	-2364,742	-996,172
	3	-1697,339	-2441,808	-996,414
	4	-1815,071	-2398,375	-996,464
Станція 6	1	-1786,885	-2321,651	-996,200
	2	-1669,089	-2364,752	- 996,196
	3	-1697,276	-2441,818	-996,431
	4	-1815,021	-2398,367	-996,479

Δx	Δy	Δz
-0,05	0,02	-0,03
-0,6	-0,03	-0,05
-0,05	0,03	0,01
-0,02	-0,04	0,05
-0,02	0,08	0,02
-0,03	0,04	0,03
-0,04	0,03	0,03
-0,04	0,06	0,02
-0,05	-0,04	0,0
-0,04	-0,05	0,04
-0,03	-0,02	0,03
-0,03	-0,02	0,04
-0,04	0,06	0,02
-0,02	0,00	0,02
-0,02	0,04	0,04
-0,04	-0,03	0,06

Таблиця 7. Визначення СКП вимірювань координат точок.

$$\sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_n^2}{12}}$$

- формула по якій

визначаємо СКП

Похибки				V
Δx^2	0,024	СКП	0,0420	0,0944
Δy^2	0,038	СКП	0,0401	
Δz^2	0,072	СКП	0,0123	

Таблиця 8. Порівняльна таблиця

Дослід 1	$\Delta x_{\text{мм}}$	$\Delta y_{\text{мм}}$	$\Delta z_{\text{мм}}$	СКП V	Загальне СКП (V)
Короткі відстані 1-5 м	0,022	0,029	0,018	0,040	0,136
Середні відстані 5-10 м	0,034	0,027	0,021	0,048	
Довгі відстані 10-20 м	0,024	0,038	0,072	0,0944	

3.2 Проведення дослідів 2

В досліді 2 розглянемо який оптимальний варіант розміщення точок є найефективніший. Для цього досліді ми обрали три варіанта розміщення опорних точок. Перший варіант – це коли опорні точки розташовані послідовно одна за одною (Рисунок 2). Спочатку на одній станції виконуємо виміри, потім перейшовши на іншу повторюємо аналогічно. Другий варіант – це коли точки розташовані по діагоналі (Рисунок 3). І третій варіант- це коли одна з точок знаходиться не в стандартному положенні як це було в попередніх варіантах, тобто опорна точка знаходиться над контрольними точками. (виміри проводяться аналогічно як і для першого та другого способу)

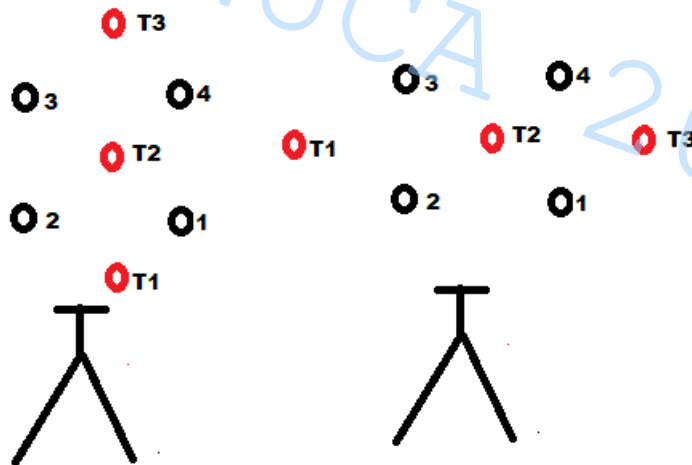


Рисунок 5 .Визначення координат точок при послідовному розміщенні.

Таблиця 9. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-1791,860	-1487,637	-680,420
	2	-1864,617	-1385,457	-680,416
	3	-1931,461	1433,064	-680,660
	4	-1858,404	1535,093	-680,702
Станція 2	1	-1791,857	-1487,646	-680,424
	2	-1864,615	-1385,470	-680,412
	3	-1931,444	1433,074	-680,644
	4	-1858,398	1535,107	-680,705

Таблиця 10.Визначення СКП вимірювань координат точок

Δx	Δy	Δz
-0,003	0,009	0,004
-0,002	0,001	-0,004
-0,017	-0,01	-0,016
-0,006	-0,014	0,003

Похибки			
Δx^2	0,034	СКП	0,00919
Δy^2	0,017	СКП	0,00976
Δz^2	0,028	СКП	0,00867

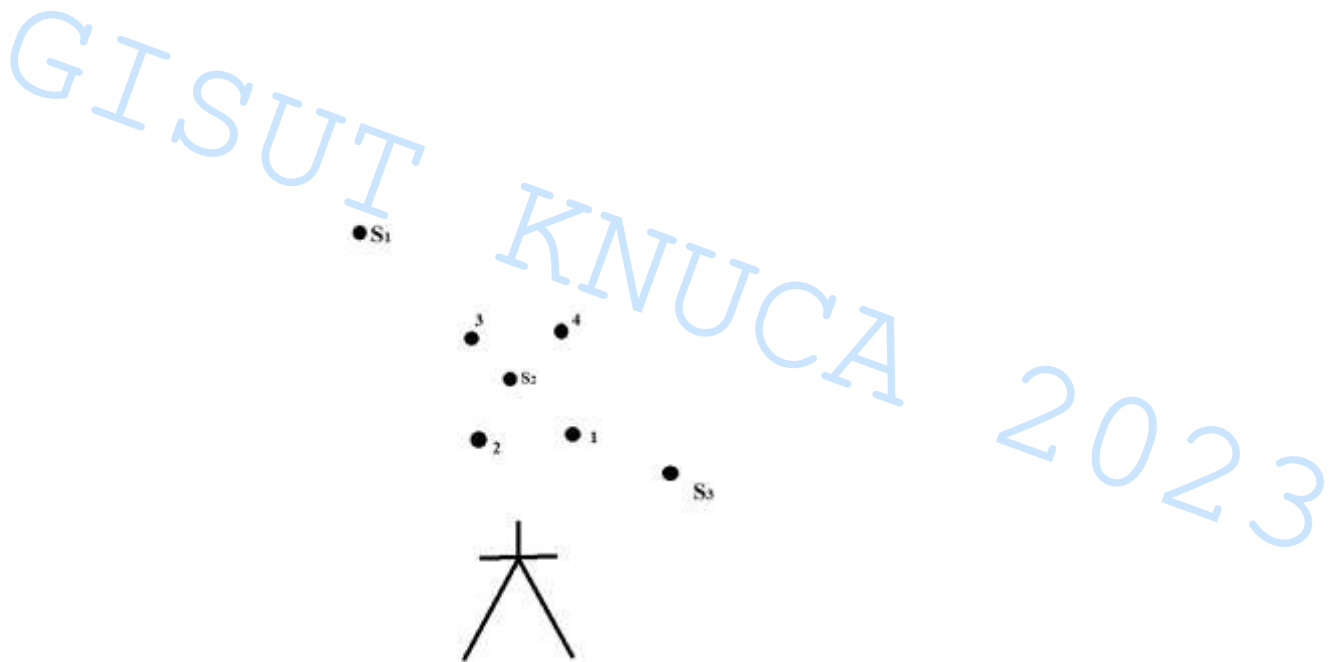


Рисунок 6. Розташування точок по діагоналі

Таблиця 11. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-1160,845	-1951,780	-966,205
	2	-1043,091	-1994,973	-966,187
	3	-1071,356	-2071,999	-966,432
	4	-1189,057	-2028,486	-966,473
Станція 2	1	-1160,810	-1951,788	-966,192
	2	-1043,045	-1994,986	-966,188
	3	-1071,316	-2072,015	-966,433
	4	-1189,012	-2028,505	-966,474

Таблиця 12. Визначення СКП вимірювань координат точок

Δx	Δy	Δz
-0,035	0,008	-0,013
-0,046	0,013	0,001
-0,04	0,016	0,001
-0,045	0,019	0,001

Похибки			
Δx^2	0,038	СКП	0,04173
Δy^2	0,042	СКП	0,01458
Δz^2	0,018	СКП	0,00656

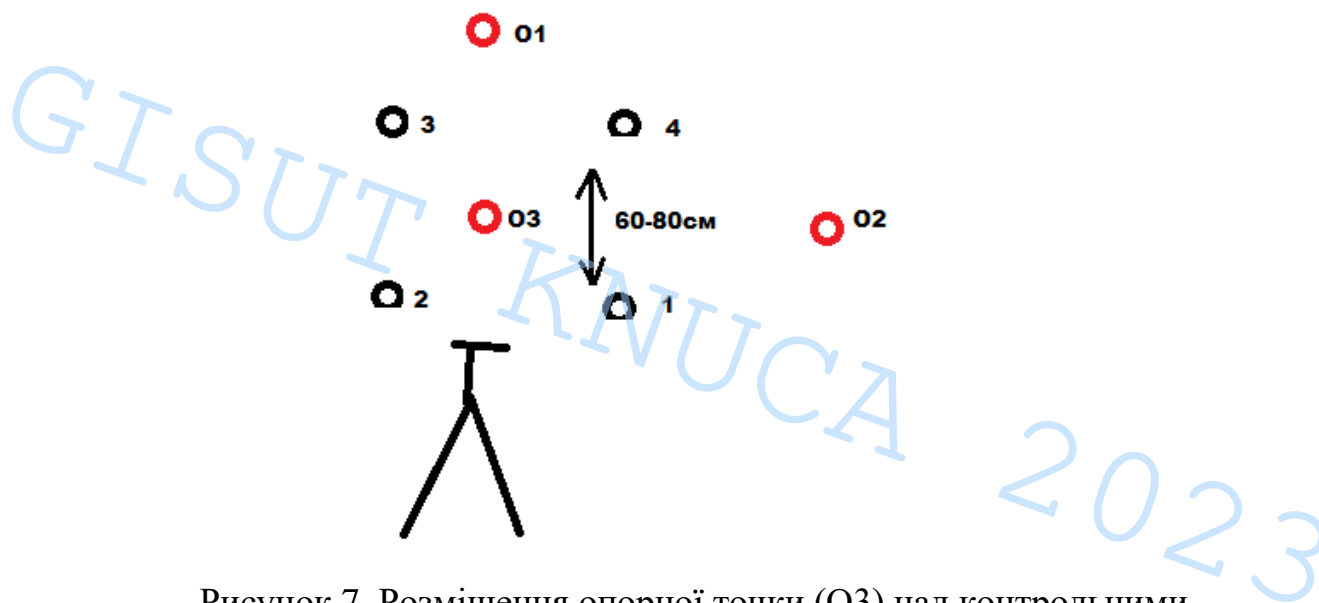


Рисунок 7. Розміщення опорної точки (O3) над контрольними.

Таблиця 13. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-2364,434	1760,114	-966,579
	2	-2319,836	1877,352	-966,578
	3	-2243,149	1848,159	-966,822
	4	-2288,065	1731,002	-966,851
Станція 2	1	-2364,476	1760,140	-966,612
	2	-2319,878	1877,378	-966,608
	3	-2243,190	1848,179	-966,848
	4	-2288,103	1731,026	-966,855

Таблиця 14. Визначення СКП вимірювань координат точок

Δx	Δy	Δz
0,042	-0,026	0,033
0,042	-0,026	0,03
0,041	-0,02	0,026
0,038	-0,024	0,004

Похибки			
Δx^2	0,011	СКП	0,04078
Δy^2	0,038	СКП	0,02412
Δz^2	0,054	СКП	0,02589

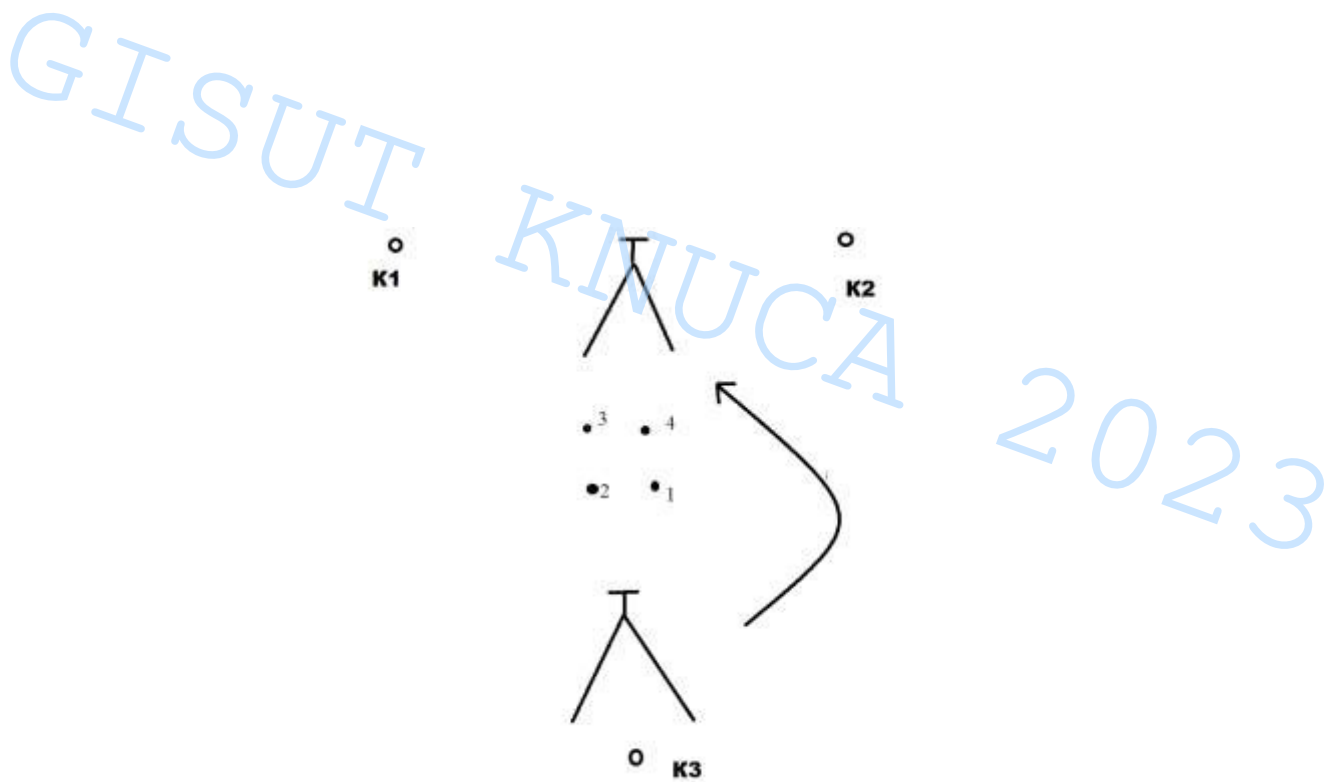


Рисунок 8. Розміщення точок трикутником

Таблиця 15. Координати контрольних точок

	Контрольні точки	X	Y	Z
Станція 1	1	-1786,952	-2321,633	-996,172
	2	-1669,137	-2364,735	-996,169
	3	-1697,335	-2441,803	-996,412
	4	-1815,068	-2398,373	-996,461
Станція 2	1	-1786,880	-2321,649	-996,198
	2	-1669,084	-2364,742	-996,194
	3	-1697,275	-2441,816	-996,429
	4	-1815,018	-2398,384	-996,475

Таблиця 16. Похибки

Похибки				V
Δx^2	0,021	СКП	0,0446	0,048
Δy^2	0,035	СКП	0,0501	
Δz^2	0,023	СКП	0,0393	

Таблиця 17.Визначення оптимального варіанту для розміщення опорних точок

Дослід 2	$\Delta x_{\text{мм}}$	$\Delta y_{\text{мм}}$	$\Delta z_{\text{мм}}$	СКП	Загальне СКП
.Визначення координт точок при послідовному розміщені.	0,034	0,017	0,028	0,047	0,0201
Розташування точок по діагоналі	0,038	0,042	0,018	0,056	
Розміщення опорної точки (ОЗ) над контрольними	0,011	0,038	0,054	0,066	
Метод трикутника	0,021	0,035	0,023	0,048	

Висновки

У першому розділі магістерської роботи проведено аналіз сучасного стану досліджень створення геодезичних мереж з використанням лазерних трекерів. Розглянуто поняття лазерного трекера та представлені його технічні характеристики. Особлива увага приділена ключовим аспектам технічних характеристик, які впливають на точність вимірювань та які можуть мати значення при дослідженні точності геодезичних мереж.

Другий розділ роботи присвячено розгляду методів дослідження точності геодезичних мереж. Розглянуті методи розрахунку точності запроєктованих геодезичних мереж, зокрема, акцентовано на ключових етапах визначення точності. Розглянуто застосування методу Монте-Карло для дослідження точності вимірювань лазерним трекером, що дозволяє реалістично моделювати і аналізувати похибки та СКТ вимірювань.

Також висвітлено дослідження оптимальної конфігурації опорної геодезичної мережі, яке допомагає визначити ефективний розмір та розташування точок контролю для максимізації точності геодезичних вимірювань.

У третьому розділі викладено результати конкретних досліджень точності побудови геодезичних мереж з використанням лазерного трекера АТ 4102. Проведено три досліді, під час яких детально розглянуті параметри позиції (X, Y, Z), повороту (X, Y, Z) та масштабного коефіцієнта для кожного інструменту (st1d3, st2d3, st3d3, st4d3).

На основі отриманих результатів роботи можна зробити висновки щодо точності та стійкості лазерного трекера АТ 4102 у вимірювальних задачах геодезичних мереж. Аномалії та відмінності між інструментами можуть

служити основою для подальших досліджень та вдосконалення методик вимірювань.

Дослідження показало високу точність лазерного трекера AT4102 в побудові геодезичних мереж. Середня абсолютна похибка вимірювань була в межах допустимих значень для геодезичних додатків. Цей цикл дослідження точності з лазерним трекером покликаний забезпечити високу якість геодезичних даних, що є важливим аспектом у сучасних геодезичних та інженерних дослідженнях.

На підставі результатів дослідження можна рекомендувати лазерний трекер AT 4102 для використання в геодезії при побудові точних та стійких геодезичних мереж. Подальші дослідження можуть включати оцінку тривалості вимірювань, впливу погодних умов та визначення максимальної дальності вимірювань.

Список використаної літератури

1. Contributors to Wikimedia projects. Laser tracker - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_tracker (date of access: 13.11.2023).
2. Tracking Progress Re Evaluating Laser Tracker Technology. Hexagon. URL: <https://hexagon.com/resources/resource-library/tracking-progress-re-evaluating-laser-tracker-technology> (date of access: 13.11.2023).
3. Абсолютний трекер Leica AT402 виробництва Hexagon MI Leica / URL: <http://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=979> (дата звернення: 17.11.2023).
4. Геодезія/Оцінка точності рядів і мереж трилатерації і лінійно-кутових мереж – Вікіпідручник. Вікіпідручник. URL: https://uk.wikibooks.org/wiki/Геодезія/Оцінка_точності_рядів_і_мереж_трилатерації_і_лінійно-кутових_мереж (дата звернення: 17.11.2023).
5. Все про лазерні далекоміри | Огородники URL: <https://ogorodniki.com/article/vse-pro-lazerni-dalekomiri> (дата звернення: 23.11.2023).
6. Оптимізація конфігурації та розміщення пунктів опорної гнссмережі дністровської гаес -- optimization of configuration and points distribution of dniester pspp gnss network
7. Джозеф М. Калкінс Кількісне визначення полів невизначеності координат, Вірджинія, 2002 – 295 с.
8. Зуска А.В. Інженерна геодезія: навч. посіб. /А.В. Зуска; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т – Дніпро: НГУ, 2016. – 209 с.
9. Polar Coordinates and Graphing (PDF). 2012.
10. Serway, Raymond A.; Jewett, Jr., John W. (2005). Principles of Physics. Brooks/Cole—Thomson Learning. ISBN 0-534-49143-X.