

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Інститут, факультет Геоінформаційних систем управління територіями
Кафедра Інженерної геодезії
Освітньо-кваліфікаційний рівень «магістр за ОПП/ОНП»
Напрямок підготовки 193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва)
Спеціалізація Геодезія
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету

„_____” _____ 20____ року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Юсан Олег Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): Створення та дослідження польового компаратора для перевірки тахеометрів та ГНСС приймачів
керівник проекту (роботи): кандидат технічних наук, доцент
Адаменко Олександр Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ _____ ” _____ року
№ _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) схема польового компаратора для перевірки віддалемірів у м. Коломия. Результати досліджень довжин ліній польового компаратора.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити).

1) Загальна характеристика об'єкту досліджень

2) Геодезичні роботи при контролі метрологічних характеристик польових компараторів для перевірки віддалемірів

3) Дослідження стабільності метрологічних характеристик польових компараторів

4) Модернізація польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС приймачів

5) Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1) Загальні відомості про об'єкт досліджень

2) Кутові та лінійні вимірювання при контролі метрологічних характеристик лінійного геодезичного базису

3) Оброблення результатів вимірювань та оцінка точності вимірювань

4) Модернізація польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС приймачів

5) Супутникові вимірювання при дослідженні метрологічних характеристик польового компаратора

6) Дослідження стабільності довжин ліній лінійного геодезичного базису

7) Повірка геодезичної техніки за допомогою польового компаратора

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
I			
II			
III			
IV			

7. Дата видачі завдання 02.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	01.11.2023	
2	Розділ 1. Загальна характеристика об'єкту досліджень	06.11.2023	
3	Розділ 2. Геодезичні роботи при контролі метрологічних характеристик польових компараторів	27.11.2023	
4	Розділ 3. Модернізація польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС приймачів	05.12.2023	
5	Розділ 4. Дослідження стабільності метрологічних	18.12.2023	

	характеристик польового компаратора		
6	Формування висновків	20.12.2023	

8. Дата видачі завдання 30.10.2023

Зав. кафедри _____ **к.т.н., доц. Дем'яненко Р. А.**
(підпис) (прізвище та ініціали) \

Керівник _____ **к.т.н., доц. Адаменко О. В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Студент _____ **Юсан О.В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕЗЮМЕ (summary) до атестаційної випускної роботи студента:		Юсан Олег Валерійович	
Назва ВНЗ	Київський національний університет будівництва і архітектури		
Тема	Створення та дослідження польового компаратора для перевірки тахеометрів та ГНСС приймачів		
Освітній ступень	Магістр за освітньо-професійною програмою навчання		
Факультет	Геоінформаційних систем та управління територіями		
Кафедра	Інженерної геодезії		
Спеціальність	193 Геодезія та землеустрій		
Спеціалізація	Геодезія		
Керівник	Адаменко О.В., к.т.н., доцент		
Обсяг роботи:	пояснювальна записка, стор.	розділів	креслень формату А1
	73	4	0

Розділ 1	Виконано аналіз мети та задач створення польових компараторів. Визначено загальні характеристики польових компараторів, їх основні типи. Досліджено вимоги, що пред'являються до облаштування польових компараторів.
Розділ 2	Виконано аналіз методів досліджень метрологічних характеристик польових компараторів. Розроблено методику кутових та лінійних вимірювань при визначенні метрологічних характеристик польових компараторів. Виконано попередні обчислення результатів вимірювань, оброблення та оцінку точності вимірювань метрологічних характеристик польових компараторів.
Розділ 3	Розроблено схему модернізації польового компаратора для забезпечення можливості повірки та калібрування ГНСС приймачів. Проведено супутникові вимірювання при дослідженні метрологічних характеристик польового компаратора. Виконано оброблення результатів вимірювань
Розділ 4	Виконано аналіз проблем створення та утримання польових компараторів. Досліджено фактори що впливають на результати вимірювань під час проведення повірки геодезичної техніки на польовому компараторі. Виконано дослідження стабільності ліній польового компаратора.
Висновки по роботі:	Виконано аналіз вимог до створення та дослідження польових компараторів. Виконано розроблення методики сумісного вирівнювання результатів вимірювань довжин ліній польового компаратора. Розроблено схему модернізації польового компаратора для забезпечення можливості повірки та калібрування ГНСС приймачів. Виконано дослідження стабільності ліній польового компаратора.
Ключові слова: польовий компаратор, метрологічні характеристики, калібрування Keywords: field comparator, metrological characteristics, calibration	

Укладач: Ткаченко Артем Валентинович
Керівник: Адаменко Олександр Вікторович
“15” грудня 2023

Вступ	7
Розділ 1. Загальна характеристика об'єкту досліджень	9
1.1 Мета та задачі створення польового компаратора.....	9
1.2 Загальна характеристика польових компараторів, їх основні типи..	9
1.3 Вимоги до польових компараторів.....	16
1.4 Конструкція геодезичних знаків, їх закладка та забезпечення примусового центрування.....	19
Розділ 2. Геодезичні роботи при контролі метрологічних характеристик польових компараторів	22

2.1. Кутові та лінійні вимірювання при контролі метрологічних характеристик польового компаратора.....	22
2.2 Попередні обчислення результатів вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора.....	26
2.3 Оброблення результатів вимірювань польового компаратора.....	36
2.4 Оцінка точності результатів вирівнювання вимірювань.....	48
2.5 Визначення довжин ліній польового компаратора.....	49
<i>Розділ 3. Модернізація польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС приймачів.....</i>	52
3.1 Розроблення схеми модернізації польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС-приймачів.....	52
3.2 Супутникові вимірювання при контролі метрологічних характеристик польового компаратора.....	55
3.3 Оброблення супутникових спостережень.....	59
<i>Розділ 4. Дослідження стабільності метрологічних характеристик польових компараторів.....</i>	67
4.1 Аналіз проблем створення та утримання польових компараторів..	67
4.2 Аналіз джерел похибок при повірці геодезичної техніки.....	70
4.3 Дослідження стабільності довжин ліній польового компаратора...	72
<i>Висновки.....</i>	80
<i>Список літератури.....</i>	81

GISUT KNUCA 2023

Вступ

Одним із найважливіших параметрів геодезичних вимірювань є їх точність. Якісно виконані геодезичні виміри дозволяють спростити та пришвидшити будівельний процес, одночасно забезпечуючи економію часу та матеріально-технічних ресурсів. Забезпечення належної якості геодезичних вимірювань, в першу чергу їх точності, виконують шляхом використання системи забезпечення якості вимірювань.

Така складається з кількох елементів, серед яких виконання вимірювань підготовленим персоналом, що має відповідну освіту та технічні

навички, використання стандартизованих методів і засобів вимірювань, що використовуються при геодезичному забезпеченні різних технологічних процесів на будівництві та указані у відповідній нормативно-технічній документації.

Різноманітні засоби вимірювань, що використовуються під час геодезичних вимірювань, повинні мати належну точність вимірювань та технічних стан. Це досягається шляхом проведення польових перевірок геодезичних приладів та періодичного контролю метрологічних характеристик останніх в центрах стандартизації та метрології.

Одним із найважливіших еталонних засобів, що використовується при повірці та калібруванні геодезичної техніки є польовий компаратор. Залежно від конструкції та умов використання польові компаратори використовують при повірці та калібруванні віддіалемірної частини геодезичних приладів (тахеометрів, віддалемірів, лазерних рулеток), ГНСС-приймачів, кутомірної частини геодезичних приладів, оптичних та цифрових нівелірів, 3D сканерів та приладів вертикального проектування.

Метою даної роботи є опис геодезичних робіт що виконують при створенні польового компаратора для повірки та калібрування віддіалемірів у м. Коломия Івано-Франківської області. Науковою частиною роботи є дослідження стабільності пунктів польового компаратора та розроблення методу вдосконалення польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС-приймачів. Удосконалення польового компаратора необхідно виконати за умови мінімального комплексу робіт та за умови максимального використання існуючих пунктів польового компаратора.

GISUT
KNUCA
2023

Розділ 1. Загальна характеристика об'єкту досліджень

1.1 Мета та задачі створення польового компаратора

Основною метою створення польового компаратора є отримання еталонного засобу який дозволить відтворювати, зберігати та передавати одиницю довжини іншим засобам вимірювальної техніки з необхідною точністю. При цьому, залежно від типу, польовий компаратор також може передавати одиниці вимірювань кутів – кутові секунди.

При цьому польовий компаратор дозволяє вирішувати ряд науково-прикладних задач:

- повірка та калібрування різноманітних геодезичних засобів вимірювальної техніки;
- дослідження та вдосконалення сучасних методів та технологій геодезичних вимірювань;
- дослідження різноманітних геометричних параметрів геодезичних ЗВТ – постійних або циклічних поправок віддалемірів, фазового центру антен приймачів ГНСС та інші;
- визначення та дослідження параметрів переходу між різноманітними геодезичними системами координат;
- дослідження стабільності різноманітних конструкцій геодезичних пунктів примусового центрування;
- дослідження схем побудови високоточних інженерно-геодезичних мереж та методів їх побудови;
- проведення навчання методам та засобам геодезичних вимірювань.

1.2 Загальна характеристика польових компараторів, їх основні типи

Геодезичні віддалеміри під час вимірювань віддалей прямо і незалежно реалізують визначення одиниці довжини – метра через швидкість світла і вимірний час проходження сигналу. Зауважимо, що еталонний віддалемір може бути як окремим приладом так і входити у склад електронного тахеометра.

В джерелах еталонні польові компаратори часто називаються еталонними геодезичними базисами, еталонними лінійними полігонами тощо. На нашу думку найбільш коректним є термін польові компаратори.

Питанням дослідженню польових компараторів приділено багато уваги у науковому середовищі. Серед українських дослідників варто приділити увагу роботам Тревого І.С., Купко В.С., Цюпак І.М., Самойленка О.М., Адаменка О.В. Питаннями польових компараторів широко займались

науковці з Фінляндії, Швейцарії, Чехії, Австрії та інші. Серед закордонних виконавців в першу чергу варто виділити роботи J. Jokela, [R. Putrimas](#).

Зазвичай польові компаратори споруджують двох типів – лінійні та віялові. В лінійних або класичних польових компараторах всі пункти компаратора розташовують вздовж одного напрямку – створу. В Україні такі польові компаратори були споруджені у Харкові (ННЦ «Інститут метрології»), Львові (Львівська політехніка), Херсоні (ДП «Херсонстандартметрологія») та в м. Коломия (ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»).

В віялових польових компараторах пункти польового компаратора розташовано довільним чином, таким чином щоб утворювати геодезичну мережу. Довжини ліній польового компаратора в такому випадку визначають через вирівнювання геодезичної мережі. Такі польові компаратори часто слугують також для повірки та калібрування ГНСС-приймачів. Польові компаратори віяльного типу були споруджені в Києві (ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), Львові (Львівська політехніка), Запоріжжі (ДП «Запоріжжястандартметрологія») та Миколаєві (ДП «Миколаївстандартметрологія»).

В світі більшу популярність набули польові компаратори лінійного типу, оскільки останні дозволяють більш якісно контролювати параметри навколишнього середовища, що призводить до більш високої точності визначення довжин ліній польового компаратора. Так чи не найкращий польовий компаратор в світі, який знаходиться у Фінляндії є польовим компаратором саме створеного типу. Компаратори лінійного типу часто використовують виробники геодезичного обладнання, наприклад Leica Geosystems AG у Швейцарії.

Польові компаратори лінійного типу мають ряд переваг, що обумовлює їх більш широке використання, проте можуть використовуватись тільки для повірки та калібрування віддалемірів. Розташування всіх пунктів

польового компаратора в одному створі дозволяє більш якісно контролювати параметри навколишнього середовища під час вимірювань. Також таке розташування пунктів польового компаратора дозволяє застосовувати комбінування вимірювань під час контролю довжин ліній польового компаратора – виконувати виміри на різних його пунктах. Згідно нормативних документів польові компаратори для перевірки та калібрування віддалемірів рекомендовано споруджувати лінійного типу.

Розглянемо деякі із перелічених вище польових компараторів.

Липецький польовий компаратор (м. Харків, ННЦ «Інститут метрології») є польовим компаратором другого розряду лінійного типу. На компараторі реалізовано відтворення довжин ліній від 0 до 1000 м. Всі пункти компаратора закріплено пунктами примусового центрування, піднятими над поверхнею землі на висоту від 1,5 до 4 м. Відхиленні від створу пунктів польового компаратора не перевищує 10 см. На кожному пункті польового компаратора автоматично, без участі оператора, виконується вимірювання параметрів навколишнього середовища. Створне та рівномірне розташування пунктів польового компаратора дозволяє виконувати контроль параметрів навколишнього середовища рівномірно протягом усієї вимірюної відстані. Зовнішній вигляд польового компаратора представлений на рис. 1.2.1.

Рис.1.2.1 Загальний вигляд польового компаратора Липці

Яворівський польовий компаратор (м. Львів, Львівська політехніка») по факту складається із двох частин:

1. Еталонна фундаментальна геодезична мережа (5 пунктів, створена у 2001 році), використовується для дослідження ГНСС-приймачів;
2. Еталонний лінійний базис (20 пунктів, створена у 2002 році), використовується для дослідження віддалемірів.

Окрім того, на польовому компараторі створену мережу геометричного нівелювання та розвинута опорна гравіметрична мережа.

Схема Яворівського польового компаратора, у складі еталонної геодезичної мережі та еталонного лінійного базису показано на рис. 1.2.2.

GISUT KNUCA 2023

Рис.1.2.2. Схема Яворівського польового компаратора

Польовий компаратор ПКЛК-98 (м. Київ, ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ») є польовим компаратором віялового типу та використовується для перевірки і калібрування віддалемірів, ГНСС-приймачів, буссолей, оптичних і цифрових нівелірів, лазерних 3D сканерів. Значення координат пунктів польового компаратора та еталонних довжин ліній визначають шляхом сумісного вирівнювання високоточних лінійно-кутових вимірювань на пунктах польового компаратора та вимірювань високоточних ГНСС-приймачів у статичному режимі вимірювань із сесіями не менше 4 годин з обов'язковим включенням вимірювань перманентного пункту

вихідної ГНСС мережі ДГМ України GLSV. Схема та загальний вигляд пунктів польового компаратора ПКЛК-98 показана на рис. 1.2.3. та 1.2.4

Рис. 1.2.3 Схема польового компаратора ПКЛК-98

Рис. 1.2.4 Загальний вигляд пунктів польового компаратора ПКЛК-98

Польовий компаратор в м. Коломия (ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»), створений у 2019 р., є польовим компаратором лінійного типу та складається з 7 пунктів. Польовим компаратором закріплено дожини ліній 50 м, 100 м, 200 м, 600 м, 1000 м та 1300 м. Відхилення від створу пунктів польового компаратора не перевищує 3 см в плані і 20 см по висоті. Такі значення довжин ліній польового компаратора вибрано урахуванням надійного визначення адитивної та мультиплікативної складових похибок вимірювань ліній віддалемірами. Схему польового компаратора у м. Коломия показано на рис. 1.2.5

Рис. 1.2.5 Схема польового компаратора у м. Коломия

Вигляд пунктів польового компаратора показано на рис. 1.2.6

Рис. 1.2.6 Конструкція пунктів польового компаратора у м. Коломия

Оскільки польовий компаратор у м. Коломия було створено 3 роки назад, виникла задача дослідження стабільності пунктів польового компаратора. Іншою задачею є модернізація польового компаратора з метою можливості проведення повірки та калібрування ГНСС-приймачів.

1.3 Вимоги до польових компараторів

Основні вимоги, що пред'являються до польових компараторів відносяться до території, на якій він споруджений. Між базовим та всіма іншими пунктами польового компаратора повинна забезпечуватись видимість. Територія на якій знаходиться польовий компаратор повинна бути рівнинною. Польовий компаратор повинен відповідати наступним вимогам:

1. Територія на якій розташований компаратор має бути відкритою, із рівнинною поверхнею. Повинна забезпечуватись зручність під'їздів до пунктів польового компаратора;
2. Пункти польового компаратора повинні забезпечувати довготривале зберігання та високу точність центрування приладів;
3. Польовий компаратор повинен мати оптимальну форму та забезпечувати високу стабільність його інтервалів;
4. Польовий компаратор для перевірки та калібрування віддалемірів повинен мати ділянку, пристосовану для визначення циклічної поправки віддалеміра (Рис. 1.3.1);

Рис. 1.3.1 Ділянка для дослідження циклічної поправки віддалемірів на Яворівському польовому компараторі

5. Повинна забезпечуватись однакове освітлення ліній польового компаратора, тобто повинно бути відсутнє чергування тінювих і яскраво освітлених ділянок;

6. Повинні виконуватись роботи із періодичного контролю метрологічних характеристик польового компаратора;

7. Повинно забезпечуватись періодичне обстеження пунктів польового компаратора з метою отримання якісних характеристик їх стану;

Відмітимо ще ряд вимог, рекомендованих до улаштування польового компаратора:

1. Відстань від пунктів польового компаратора до ліній електропередач не повинна бути меншою за 100 м;

2. Перешкоди вздовж ліній польового компаратора, а саме балки, яри, вибоїни, повинні мати ширину менше 20 м;

3. Польовий компаратор повинен розташовувати не ближче 10-15 м від шосейних або ґрунтових доріг;

4. Польовий компаратор повинен розташовувати не ближче 100 м від залізної дорожньої полотна;

5. Ухил довжин ліній польового компаратора не повинен перевищувати 1/10;

6. Висота візирного променя над поверхнею землі повина бути не менше 1 м (1,5 м для високоточних віддалемірів);

Точки базису повинні розташовуватися в створі. Допустиме відхилення точок окремих інтервалів від створу визначають з виразу

де D - довжина інтервалу базису.

Перевищення між точками базису повинні бути відомі з похибками m_h не більше величини, яка визначається за формулою

де h - перевищення між точками базису,

- відносна похибка довжини інтервалів базису.

Основні вимоги до польових компараторів наведено у ГОСТ 8.503-84.

У табл. 1.3.1 наведено характеристики точності та призначення польових компараторів.

Таблиця 1.3.1. Характеристики точності польових компараторів

Розряд базису	Точність	Діапазон вимірювання, км	Призначення
0	$1-3 \cdot 10^{-7}$	0.1-1	робочий еталон
1	$3-5 \cdot 10^{-7}$	1-20	атестація високоточних віддалемірів
2	$1-1.5 \cdot 10^{-6}$	1-20	атестація геодезичних та топографічних електромагнітних віддалемірів
3	$3-4 \cdot 10^{-6}$	2-5	перевірка радіовіддалемірів та окремих типів світловіддалемірів
4	$2-3 \cdot 10^{-5}$	0.3-1	перевірка віддалемірів геометричного та механічного типів

Довжини ліній польових компараторів рекомендують вибирати у значеннях, кратних довжині хвиль віддалеміра. Це дозволяє значно зменшити вплив циклічних похибок на результати вимірювань. Таким чином, в минулому, коли довжини хвиль випромінюючого сигналу віддалемірів дорівнювали 24 м, рекомендовані значення довжин ліній польового компаратора визначались згідно табл.1.3.2

Таблиця 1.3.2 Рекомендовані значення довжин ліній польового компаратора

Найменування елементів зразкового базису	Значення характеристик для базисів		
	2 розряду	3 розряду	4 розряду
Загальна довжина, км	1 - 20	2 - 5	0,3 - 1
Рекомендована кількість точок (пунктів)	8 - 12	6 - 8	6 - 12
Довжина інтервалів базису, м	24, 48, 72, 96, 192, 288, 384, 480, 984, 1488, 2016, 3000		24, 48, 72, 96, 120, 168, 192, 288, 348, 984

З розвитком технологій, виробники геодезичного обладнання змогли значно зменшити вплив циклічних похибок, похибок вимірювань залежних від довжини хвилі. Наразі циклічні похибки у віддалемірах не перевищують 1 мм, а у високосних приладах вони значно менші за 0,3 мм. Змінилась також і довжина хвилі у віддалемірах. В сучасних електронних тахеометрах довжина хвилі випромінюючого сигналу зазвичай становить 2 м. Таким чином, вимоги щодо рекомендованих значень довжин ліній польового компаратора, зазначені у нормативних документах, більше не є актуальними.

1.4 Конструкція геодезичних знаків, їх закладка та забезпечення примусового центрування

Як було вказано у пункті 1.3, основними вимогами до польових компараторів є вимоги до стабільності пунктів польового компаратора та видимістю між ними. Перша вимога забезпечується через використання спеціальних пунктів, які за конструкцією забезпечують довготривалу стійкість пунктів та необхідну точність центрування приладів над ними. Таким чином, пункти польового компаратора повинні реалізовувати схему примусового центрування геодезичних приладів, оскільки саме примусове центрування дозволяє досягти високої точності центрування геодезичних

приладів та зменшити вплив різних систематичних похибок на результати вимірювань.

Допускається використання різноманітних схем центрування приладів над пунктами польового компаратора. Головною умовою є забезпечення необхідної точності центрування приладів. Найчастіше, для забезпечення цієї вимоги, на пунктах польового компаратора використовують примусове центрування. В такому випадку використовують два варіанти примусового центрування:

1. В пунктах польового компаратора зроблено отвір, діаметр якого співпадає з діаметром закріпного гвинта приладу (рис. 1.4.1). Така схема дозволяє змінювати закріпні гвинти для приладів із різною метрикою різби;

GISUT
KNUCA
2023

Рис. 1.4.1 Схема реалізації примусового центрування на пунктах польового компаратора

2. В пунктах польового компаратора закріплюються безпосередньо закріпні гвинти, на які потім встановлюються геодезичні прилади. Така схема дозволяє виконувати центрування приладів із більш високою точністю, проте

вимагає використання різноманітних перехідників при використанні геодезичних приладів із іншою метрикою різьби.

Іншою проблемою є забезпечення стійкості пункту протягом тривалого періоду. Для забезпечення цієї вимоги використовують пункти спеціальної конструкції. Глибина закладання такого пункту – не менше 1,5 м нижче глибини промерзання. В нижній частині пункту облаштовують якір – масивну частину пункту, яка забезпечує його стійкість. За якір приймають куб, залитий бетоном, з геометричними розмірами 1 * 1 * 1 м. Діаметр пункту – $\varnothing \sim 28$ см, Під поверхнею землі від додатково схованій у захисну трубу. На верхньому торці пункту приварена металева пластина, товщиною 15 мм та отвором для гвинта $\varnothing 16$ м (рис. 1.4.2).

До нижньої пункту приварюється металевий диск діаметром на 2 - 3 см менше діаметра свердловини. Крім того, рівномірно по висоті (через 4 - 5 м) до труби прикріплюються (приварюються) кільця (распіратори) такого ж діаметру, як і диск. Кільця служать для запобігання труби від згинання при засипці свердловини ґрунтом.

Рис. 1.4.2 Конструкція пункту польового компаратора

Розділ 2. Геодезичні роботи при контролі метрологічних характеристик польових компараторів

2.1. Кутові та лінійні вимірювання при контролі метрологічних характеристик польового компаратора

Вимірювання при контролі метрологічних характеристик польового компаратора виконують у ранкові та вечірні години з метою мінімізації впливу зовнішніх умов на результати вимірювань, в першу чергу рефракції та конвекції повітря. Необхідними умовами вимірювань є добра видимість на пункти польового компаратора та чітка контрастність. Бажаними умовами вимірювань є відсутність атмосферних опадів та забезпечення захисту від дії прямих сонячних променів, оскільки під їх впливом відбувається нерівномірний односторонній нагрів пунктів польового компаратора та геодезичних приладів під час вимірів. З метою отримання оптимальних умов вимірювань, під час їх проведення використовують геодезичні парасольки, що надійно захищають геодезичні пункти від дії сонячного опромінення та атмосферних опадів.

Під час виконання лінійно-кутових вимірів виконують ретельну фіксацію та врахування параметрів навколишнього середовища, а саме температури повітря, атмосферного тиску та відносної вологості. Вимірювання параметрів атмосфери необхідно виконувати у місцях, що знаходяться у затінку та мають легкий вітерець. При цьому, необхідна точність контролю параметрів навколишнього середовища наступна:

- точність визначення температури — не гірше 1°C;
- точність визначення атмосферного тиску — не гірше 1 кПа;
- точність визначення відносної вологості — не гірше 10%.

Вимірювання атмосферного тиску та відносної вологості допускається виконувати тільки на пункті, на якому виконують лінійно-кутові вимірювання, оскільки ці параметри навколишнього середовища є

доволі стійкими. Вимірювання температури допускається виконувати тільки на базовому пункті при вимірюванні довжин баз до 200 м. При вимірюванні довших ліній, вимірювання температури необхідно виконувати на двох кінцях лінії. При виконанні вимірювань ліній з довжиною понад 1000м, вимірювання температури необхідно вимірювати кожні 500 м. За результат вимірювань температури в такому випадку береться середнє арифметичне значення всіх вимірних значень на час фіксації.

Вимірювання атмосферного тиску та відносної вологості допускається виконувати щогодини. Вимірювання температури необхідно виконувати перел кожним вимірюванням нового напрямку, та у будь-якому разі не рідше ніж раз на 20 хв.

Вимірні значення параметрів навколишнього середовища фіксуються у журнал вимірювань із одночасною фіксацією часу вимірювань, та використовуються під час оброблення результатів вимірювань.

Визначення довжин ліній польового компаратора виконують за допомогою високоточних лінійно-кутових вимірювань. Вимірюванню підлягають відстані, горизонтальні та вертикальні кути (рис. 2.1.1).

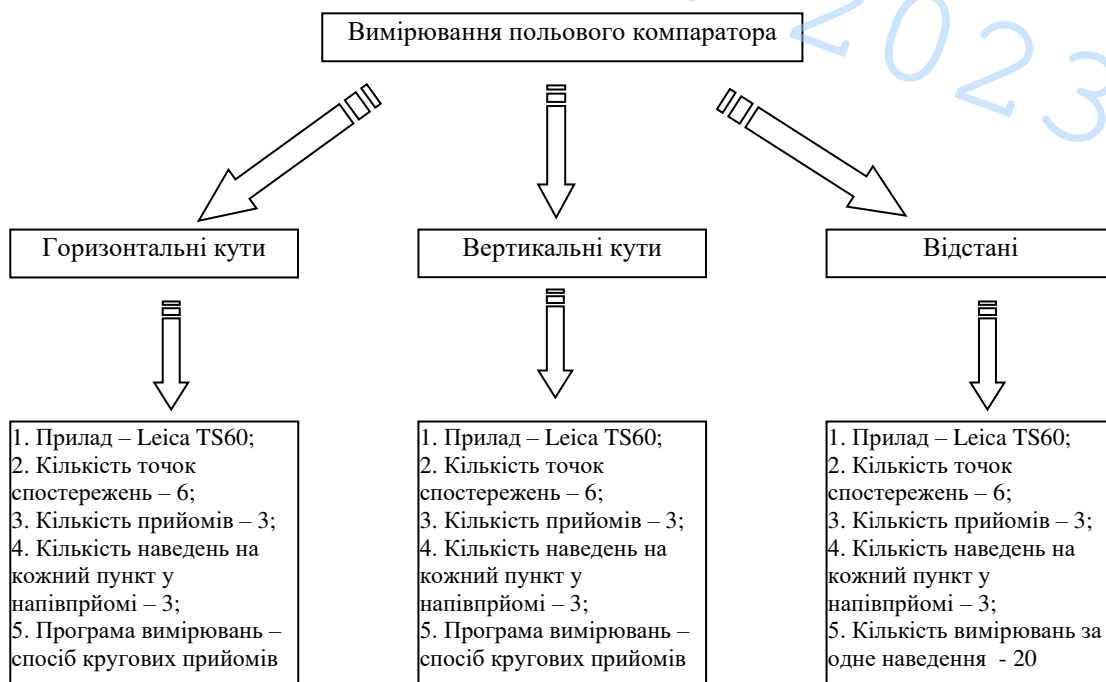


Рис. 2.1.1 Принципова схема вимірювань польового компаратора

Методика вимірювань довжин ліній польового компаратора включає вимірювання всіх його ліній у всіх комбінаціях. Така схема вимірювань дозволить виконати вирівнювання результатів вимірювань та виключити ряд систематичних похибок тахеометра, наприклад похибку визначення константи вдбивача. Як було описано у пункті 1.2, польовий компаратор має лінійний тип та має вигляд, показаний на рис. 2.1.2.



Рис. 2.1.2 Схема польового компаратора.

Згідно схеми польового компаратора та методики вимірювань, вимірювання складаються з 7 сесій. Кожній сесії відповідають вимірювання на одному із пунктів польового компаратора. Кожна сесія складається з трьох прийомів, у кожному з яких вимірювання виконують за програмою вимірювань способу кругових прийомів. Кутові вимірювання (вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів) поєднані із вимірюваннями довжин ліній. Вимірювання кожного пункту компаратора на станції виконується у три наведення у двох напівприйомах. При кожному наведенні виконується зняття відліку по горизонтальному кругу, вертикальному кругу та виконується лінійні вимірювання. Лінійні вимірювання виконуються шляхом осереднення результатів вимірювань з 20 прийомів. Таким чином, у кожному напівприйомі, на кожний пункт компаратора виконують вимірювання відстані 60 раз, у кожному прийомі - 120 разів. Загальна кількість вимірювань відстаней між станцією і довільним пунктом у кожній сесії – 360 на кожний пункт і 2520 загалом вимірювань відстаней на кожній станції. До початку кожного вимірювання відстані у кожному наведенні фіксуються параметри навколишнього середовища та заносяться у журнал вимірювань.

Вимірювання проводяться у ранкові та вечірні години для уникнення надлишкового впливу рефракції. Також бажано, щоб були спокійний стан атмосфери, відсутність атмосферних опадів і захист від прямої дії сонячних

променів, щоб виключити нерівномірний, односторонній нагрів вимірювальних приладів та іншого обладнання та устаткування, використовуваних під час вимірювального процесу.

Схема вимірювань та визначення довжин ліній польового компаратора загалом відповідає ISO 17123-4 [1] та роботі [3] та наведена на рис. 2.1.3.

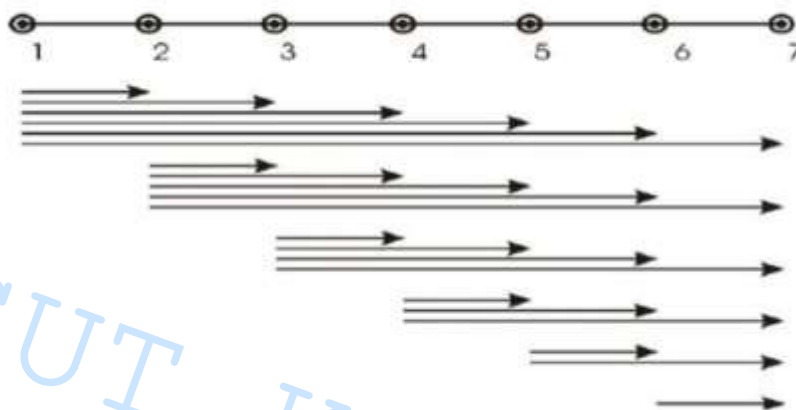


Рис. 2.1.3 Схема вимірювань довжин ліній польового компаратора

Всі виміри, зроблені під час вимірювань польового компаратора фіксуються у паперові та електронні протоколи. В електронних протоколах фіксується файл вимірювань польового компаратора. В паперових протоколах має міститись наступна інформація:

1. Об'єкт вимірювань, дата вимірювань, загальні дані;
2. Умови проведення вимірювань, зміна умов навколишнього середовища з фіксацією часу;
3. Порядок виконання вимірювань з фіксацією часу вимірювань;
4. Попередні обчислення результатів вимірювань, визначення коригованих значень довжин ліній за зміну параметрів зовнішнього середовища;
5. Попередні обчислення результатів вимірювань, визначення попередніх значень довжин баз польового компаратора;

6. Вирівнювання результатів вимірювань визначення вирівняних значень довжин баз польового компаратора;
7. Оцінка точності вимірювань.

Систему координат під час вимірювань задаємо через координати першого пункту База ($X_B = 0, Y_B = 0, H_B = 0$) та вихідного дирекційного кута з першого на останній пункт $\alpha_{B_6} = 0^\circ 00' 00''$.

2.2. Попередні обчислення результатів вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора

Попередні обчислення результатів вимірювань при визначенні метрологічних характеристик польового компаратора виконуються з метою підготовки результатів вимірювань до оброблення згідно ISO 17123-4 [1]. В загальному випадку такі роботи включають у себе ряд обчислень, а саме:

1. Врахування зміни умов навколишнього середовища та визначення виправлених значень виміряних відстаней;
2. Врахування нахилу виміряних довжин ліній та визначення горизонтальних проєкцій між пунктами польового компаратора;
3. Врахування відхилень від створу пунктів польового компаратора та визначення приведених до створу довжин ліній польового компаратора;
4. Приведення вимірювань на поверхню відносності.

Виконаємо детальний огляд кожної операції.

Врахування зміни умов навколишнього середовища

Як було вказано у попередньому пункті, під час вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора ретельно контролюють параметри навколишнього середовища. Значення температури, атмосферного тиску та відносної вологості повітря заносять у протокол перед кожним вимірюванням відстаней з фіксацією часу. Під час попереднього оброблення результатів вимірювань, співставляють значення

вимірних довжин відстаней із вимірними параметрами навколишнього середовища та визначають поправки до вимірних відстаней.

У кожного виробника геодезичних приладів розроблена модель врахування параметрів навколишнього середовища. Оскільки вимірювання метрологічних характеристик польового компаратора виконувалось за допомогою електронного тахеометра Leica TS50, врахування параметрів навколишнього середовища виконується за моделлю, розробленою фірмою Leica Geosystems AG.

Свої моделі врахування параметрів навколишнього середовища виробники геодезичного обладнання наводять в керівництвах з експлуатації електронних тахеометрів. Для електронних тахеометрів фірми Leica Geosystems AG має вигляд [16]:

$$\Delta D = 286,338 - \left[\frac{0,29535 \cdot P_{\text{сеп}}}{1 + \alpha \cdot t_{\text{сеп}}} - \frac{4,126 \cdot 0,0001 \cdot v_{\text{сеп}}}{1 + \alpha \cdot t_{\text{сеп}}} \cdot 10^{\beta} \right], \quad (1)$$

де $p_{\text{сеп}}$ — середній атмосферний тиск, мбар;

$v_{\text{сеп}}$ — середня відносна вологість, %;

$t_{\text{сеп}}$ — середня температура, °;

$$\alpha = \frac{1}{273,15},$$

$$\beta = 0,7857 + \frac{7,5 t_{\text{сеп}}}{(273,15 + t_{\text{сеп}})}. \quad (2)$$

При врахування поправки за зміну параметрів навколишнього середовища під час вимірювань, модифікуємо рівняння (1). Замість середніх значень вимірних температури, атмосферного тиску та відносної вологості запишемо різницю між вимірними значеннями параметрів навколишнього середовища під час вимірювань та значеннями, занесеними у прилад до початку вимірювань. Таким чином (1) буде мати вигляд (3):

$$\Delta D = 286,338 - \left[\frac{0,29535(P_i - P_0)}{1 + \alpha(t_i - t_0)} - \frac{4,126 \cdot 0,0001(v_0 - v_i)}{1 + \alpha(t_i - t_0)} \cdot 10^{\beta_i} \right], \quad (3)$$

де P_0, t_0, v_0 – занесені у пам'ять електронного тахеометра значення атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря;

P_i, t_i, v_i – виміряні значення атмосферного тиску, температури та відносної вологості повітря під час вимірювань i -ої відстані;

$$\beta_i = 0,7857 + \frac{7,5(t_i - t_0)}{(273,15 + t_0)}. \quad (4)$$

Табл. 2.2.1. Необроблені результати циклу вимірювань лінії базису 1-2

Серійний номер тахеометру	Дата проведення вимірювань	Позначення лінії базису	Ім'я точки (лінії) з тахеометру	Час виконання кожного вимірювання, г.хв.с.	Виміряне значення нахиленої відстані без поправок, Dsd, м
884800	2018-06-21	Baza-6	TS0001	10:17:35	1299,9459
			TS0002	10:17:44	1299,9460
			TS0003	10:17:50	1299,9458
			TS0004	10:17:55	1299,9458
			TS0005	10:18:02	1299,9459
			TS0006	10:18:07	1299,9459
			TS0007	10:18:12	1299,9460
			TS0008	10:18:17	1299,9461
			TS0009	10:18:22	1299,9460
			TS0010	10:18:27	1299,9461
			TS0011	10:18:31	1299,9463
			TS0012	10:18:36	1299,9462
			TS0013	10:18:46	1299,9463
			TS0014	10:18:51	1299,9465
			TS0015	10:18:55	1299,9464
			TS0016	10:19:01	1299,9462
			TS0017	10:19:06	1299,9463
			TS0018	10:19:10	1299,9462
			TS0019	10:19:15	1299,9462
			TS0020	10:19:19	1299,9461

Наведемо приклад розрахунку поправок та виправлених значень вимірних відстаней за рахунок зміни умов навколишнього середовища під час вимірювань польового компаратора у табл. 2.2.1 та 2.2.2.

Вимірян значення параметрів навколишнього середовища та виправлені значення вимірних довжин ліній показано у табл. 2.2.2

Вимірне значення нахиленої відстані без поправок, Dsd, м	Температура навколишнього повітря, t, °C			Атмосферний тиск, p, гПа			Відносна вологість, v, %			Атмосферна поправка, ΔD, мм/км	Скоригована довжина нахиленої відстані, D, м
	t _c (st002)	t _k (st003)	t _{cp}	p _c (st002)	p _k (st003)	p _{cp}	v _c (st002)	v _k (st003)	v _{cp}		
1299,9459	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9688
1299,9460	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9689
1299,9458	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9687
1299,9458	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9687
1299,9459	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9688
1299,9459	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9688
1299,9460	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9687
1299,9461	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9688
1299,9460	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9687
1299,9461	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9688
1299,9463	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9690
1299,9462	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9689
1299,9463	25,34	25,79	25,38	995,17	995,33	995,04	36,98	33,24	33,96	17,48	1299,9690
1299,9465	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9694
1299,9464	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9693
1299,9462	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9691
1299,9463	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9692
1299,9462	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9691
1299,9462	25,26	25,83	25,47	995,18	995,20	994,99	37,05	33,71	34,38	17,58	1299,9691
1299,9461	25,29	25,83	25,37	995,15	995,20	994,99	36,98	34,64	34,67	17,49	1299,9688

Врахування нахилу вимірних довжин ліній

Врахування нахилів вимірних відстаней виконується по загальновідомих формулах з курсу «Геодезія». Під час вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора отримують значення

нахилених відстаней від електронного тахеометра до високоточного відбивача S_i та кут нахилу v_i . Додатково під час вимірювань визначають висоту тахеометра над столиком пункту польового компаратора i та висоту відбивача h (рис. 2.2.1).

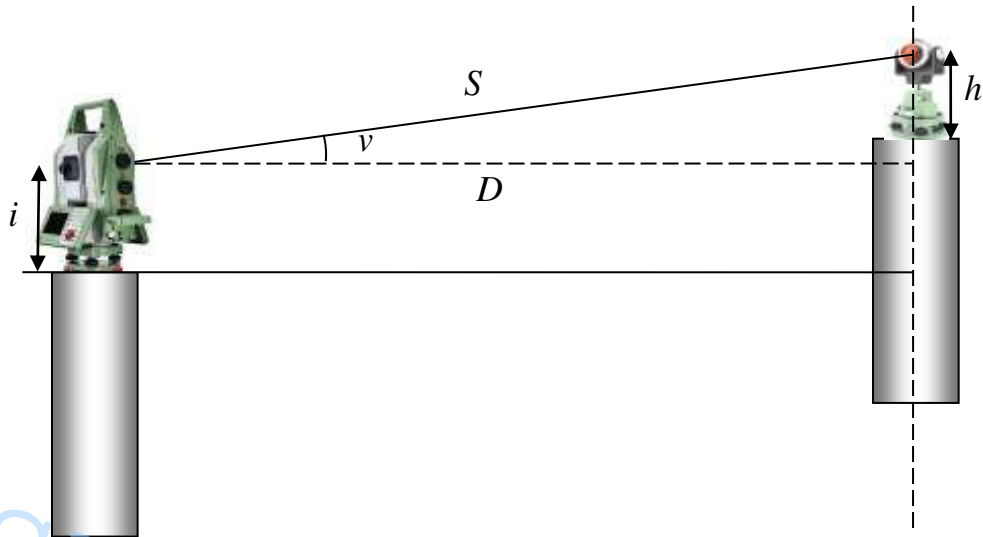


Рис. 2.2.1 Схема визначення горизонтальних проєкцій між пунктами польового компаратора.

Згідно рис. 2.2.1 горизонтальна проєкція D та перевищення між пунктами Δh можуть бути визначені за формулами:

$$D_i = S_i \cos v_i, \quad (5)$$

$$\Delta h_i = S_i \sin v_i + i - h. \quad (6)$$

де v_i – середнє значення кута нахилу між пунктами польового компаратора, визначений за результатами вимірювання вертикальних кутів при КЛ та КП.

Врахування відхилень від створу пунктів польового компаратора

Можливість сумісного вирівнювання результатів вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора можлива тільки у випадку їх розташування в одному створі. Проте на практиці встановити пункти польового компаратора точно у створ є дуже складною задачею. Зазвичай пункти польового компаратора встановлюють у створ із певним

допуском. Так пункти польового компаратора у м. Коломия встановлені у створ з точністю 5 см. Проте, така точність встановлення пунктів вимігас приведення результатів вимірювань до одного створу. На рис. 2.2.2 показана принципова схема приведення результатів вимірювань відстаней між пунктами польового компаратора до одного створу (для вимірювань на першому або останньому пункті).

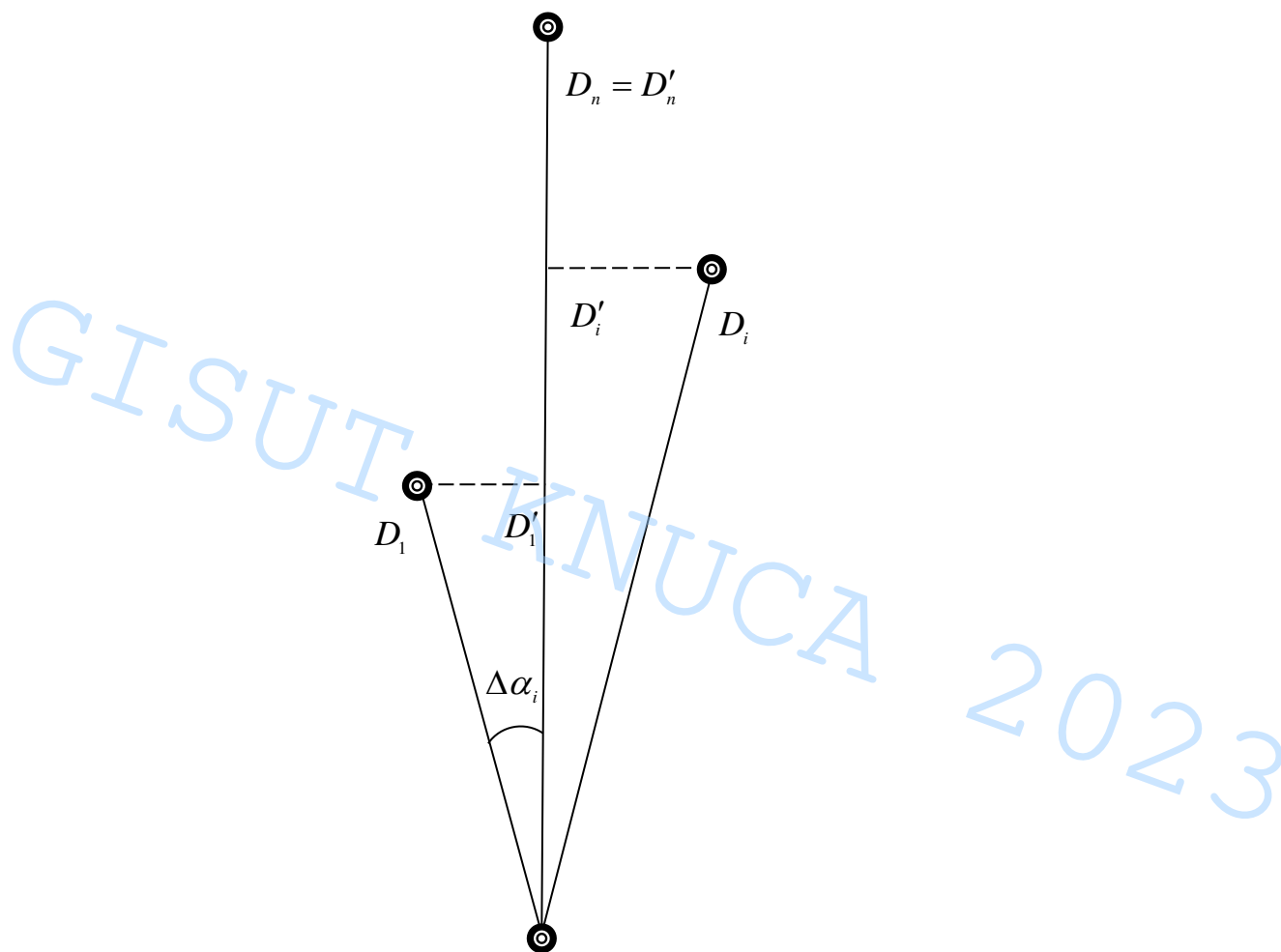


Рис. 2.2.2 Схема приведення результатів вимірювань до створу

Дану задачу можна розділи на дві частини – визначення приведених значень горизонтальних проекцій для створу для вимірювань на першому та останньому пунктах польового компаратора, та визначення приведених значень горизонтальних проекцій для вимірювань на інших пунктах польового компаратору (рис. 2.2.3).

В якості створу польового компаратора задана лінія між крайніми пунктами польового компаратора Ваза-6.

У випадку вимірювань на першому або останньому пункті польового компаратора задача має наступне рішення.

а) визначаємо дирекційні кути з першого пункту на інші:

$$\alpha_{Bi} = \arctg \frac{Y_i - Y_B}{X_i - X_B}, \quad (7)$$

б) визначаємо зміну дирекційного кута при вимірюванні кожного пункту відносно останнього:

$$\Delta\alpha_i = \alpha_{Bi} - \alpha_{B6}, \quad (8)$$

в) визначаємо значення горизонтальної проєкції, приведеної до створу:

$$D'_{Bi} = D_{Bi} \cos \Delta\alpha_i, \quad (9)$$

При вимірюваннях на проміжних пунктах польового компаратора задача приведення горизонтальних проєкцій до створу має дещо складніше вирішення (рис. 2.2.3):

а) визначаємо дирекційний кут з першого пункту компаратора до пункту компаратора, який використовується як станція згідно (7) та зміну дирекційного кута з першого пункту на поточний пункт згідно (8);

б) визначаємо зміну дирекційного кута при вимірюванні інших пунктів польового компаратора:

- при вимірюваннях у напрямку кінцевого пункту польового компаратора:

$$\Delta\alpha_{ij} = \alpha_{ij} - \alpha_{Bi} + \Delta\alpha_i, \quad (10)$$

- при вимірюваннях у напрямку першого пункту польового компаратора:

$$\Delta\alpha_{ij} = \alpha_{ij} - \alpha_{Bi} + 180^\circ + \Delta\alpha_i, \quad (11)$$

в) визначаємо значення горизонтальної проєкції, приведеної до створу:

$$D'_{ij} = D_{ij} \cos \Delta\alpha_{ij} \quad (12)$$

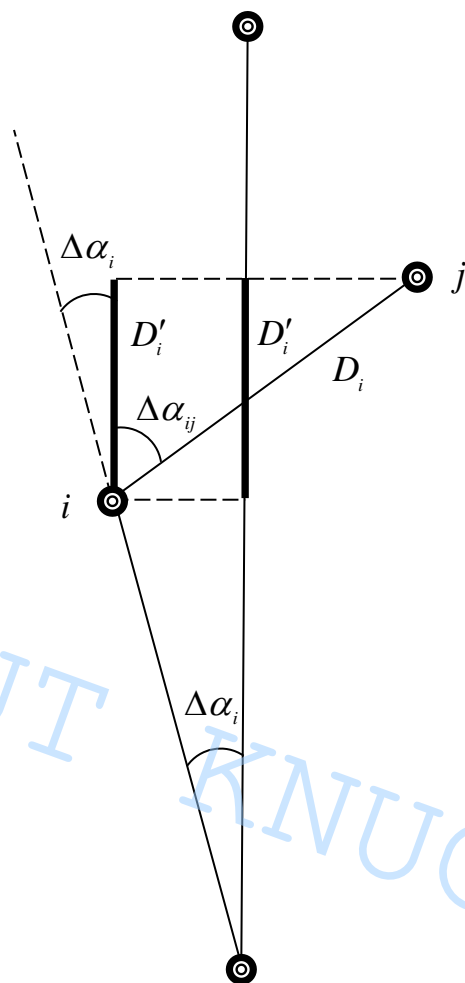


Рис. 2.2.2 Схема приведення результатів вимірювань до створу для проміжних пунктів польового компаратора.

Оскільки відхилення від створу пунктів польового компаратора в м. Коломия не перевищують 8 см, поправки до відстаней польового компаратора не будуть перевищувати 0,01 мм. Таким чином, такі обчислення не проводились.

Приведення вимірювань на поверхню відносності

Редукування вимірних довжин інтервалів базису на поверхню відносності виконується для зрівнювання результатів вимірювань у всіх комбінаціях; для порівняння довжин інтервалів, отриманих з вимірювань

базису різними типами приладів і порівняння результатів наступних періодичних повірок.

За форму поверхні відношення рекомендується вибрати сферу, радіус якої відповідає середньому радіусу кривизни Земного еліпсоїда у місці розташування польового компаратора.

Редуковані на поверхню відношення виміряні віддалі можна порівнювати між собою і використовувати для подальшого сумісного оброблення.

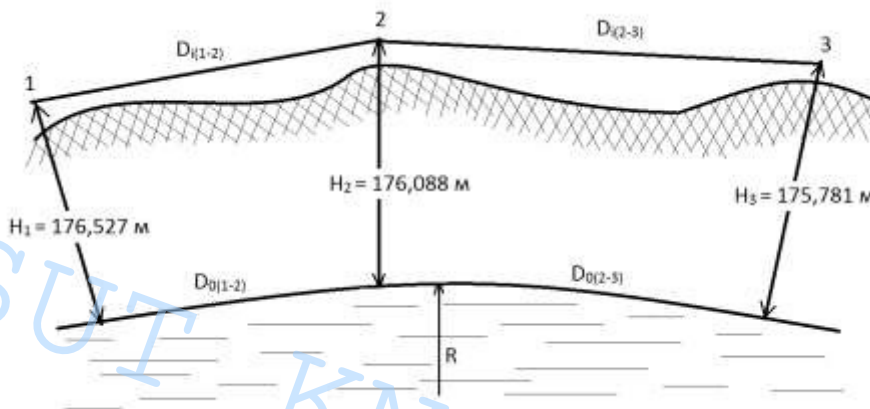


Рис. 2.2.3. Схема редукування вимірювань польового компаратора на поверхню відношення

Редуковані на поверхню відношення значення вимірних довжин сторін визначають за наступною формулою:

$$D_i^0 = D_i' - \frac{H_m}{R} D_i' - \frac{H_m^2}{R^2} D_i'^2, \quad (13)$$

де D_i^0 – редуковане на поверхню відношення значення горизонтальної проекції вимірної відстані;

H_m – середня висота точок над поверхню відношення;

R – радіус Землі.

Для спрощення та ідентифікації параметрів, в подальшому горизонтальні проекції приведені до створу компаратора будемо позначати через x_i , а довжини дуг цих ліній на сфері через y_i (рис. 2.2.4).

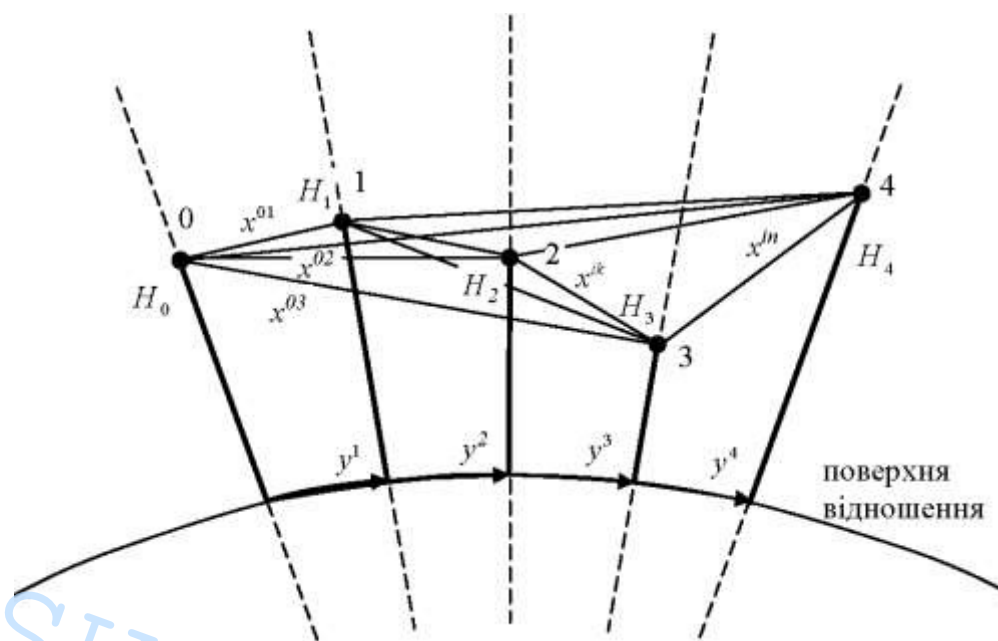


Рис. 2.2.4 Редуковані значення вимірних відстаней на поверхню відношення

Результати попередніх обчислень для станції BAZA наведено у табл..

2.2.3

Табл. 2.2.3 Попередні очислення на станції BAZA

№ станції	№ пункту наведення	Різниця висот, h_i , м	Виміряна горизонтальна проекція D , м	Поправка за різницю висот Δh м	Поправка за поверхню відносності ΔD_H , м	Редукована довжина лінії, y , м
BAZA	1	-0,2035	50,0991	0,0004	0,0023	50,0964
	2	-0,3561	100,0872	0,0006	0,0047	100,0819
	3	-0,7109	200,2170	0,0013	0,0093	200,2064
	4	-2,3540	600,1416	0,0046	0,0281	600,1089
	5	-3,7547	1000,1477	0,0071	0,0469	1000,0938
	6	-4,7302	1299,9689	0,0861	0,0610	1299,8993

Після редукування подальшому обробленню підлягають, фактично приростки довжини дуг x_m^{ik} на сферичній поверхні відношення. Визначувані параметри польового компаратора під час звірень або його калібрування - це

довжина дуг на сфері y^i від початкової точки польового компаратора до кожної наступної точки польового компаратора.

2.3 Оброблення результатів вимірювань польового компаратора

Під час визначення метрологічних характеристик польового компаратора за допомогою еталонного тахеометра, вимірювання віддалей між стовпами польового компаратора часто виконують тільки одним тахеометром. Для нього модель вимірювань має вигляд:

$$x_m^{ik} = y_m^k - y^i + p_m - d, \quad (14)$$

де $i = 0 \dots n$ - номер точки польового компаратора, на якій встановлюється тахеометр ($i = 1 \dots n$ - номер лінії польового компаратора, довжина якої визначається);

$k = 0 \dots n$ - номер точки польового компаратора, на якій встановлюється відбивач;

$m = 1 \dots M$ - номер відбивача;

x_m^{ik} - відстань між точками i та k польового компаратора, одержаний за вимірюною еталонним тахеометром віддаллю на відбивач з номером m , після її редукування на поверхню відношення (це значення отримується за результатами попередніх обчислень вимірювань і є вихідною величиною у рівнянні);

y^i, y_m^k - невідомі значення довжини ліній польового компаратора від початкової точки з номером нуль до кожної (див. рис. 2.2.4) з номерами i та k , при $i \neq k$, між якими виконувалися вимірювання;

d - оцінюване невідоме адитивне систематичне зміщення внесене віддалеміром у вимірювання довжини;

p_m - оцінюване невідоме адитивне систематичне зміщення внесене відбивачем з номером m у вимірювання довжини.

Таким чином, рівняння поправок, визначене на основі моделі вимірювань (14) буде мати вигляд (15):

$$v_{x_m^{ik}} = \delta y_m^k - \delta y^i + p_m - d + l_{x_m^{ik}}, \quad (15)$$

де $v_{x_m^{ik}}$ - поправка до виміряного значення відстані польового компаратора;

δy_m^k , та δy^i - поправки до наближених значень довжини ліній польового компаратора;

$l_{x_m^{ik}} = y_m^{0k} - y^{0i} - x_m^{ik}$ - вільний член рівняння поправок;

y^{0i} , y_m^{0k} - наближені значення довжини ліній польового компаратора з номерами i та k .

Величина d є адитивним систематичним зміщенням вимірювань тахеометром, оскільки, початок шкали повинен збігатися з віссю обертання тахеометра. Враховуючи її у моделі вимірювань, ми оцінюємо фактичне відхилення нуля шкали тахеометра від осі обертання. Під час калібрування польового компаратора, вона використовується як поправка у виміряні відстані.

Особливо актуальність застосування величини d у рівняннях виникає у випадках, коли калібрування польового компаратора виконують шляхом вимірювань його метрологічних характеристик одразу кількома електронними тахеометрами.

Значення довжини ліній польового компаратора це, фактично, одномірні координати його точок в умовній одномірній системі координат.

Початок системи координат зручно помістити в початкову точку польового компаратора, якій присвоюється нульовий номер. Тоді, для початкової точки з номером нуль рівняння поправок (15) запишеться:

$$v_{x_m^{ik}} = \delta y_m^k - \delta y^0 + p_m - d + l_{x_m^{ik}}, \quad (16)$$

Координата цієї точки, в умовній системі координат, дорівнює нулю. Під час оброблення, ця координата не отримує поправки (не змінюється),

поправки одержують тільки одномірні координати всіх інших точок. Тобто, $\delta y^0 = 0$. Ця умова забезпечує від виродження матрицю нормальних рівнянь, яка буде отримана далі.

Тоді, для всіх вимірних відстаней, вимірних з початкової точки з номером нуль, рівняння (16) прийме вигляд:

$$v_{x_m^{ik}} = \delta y_m^k + p_m - d + l_{x_m^{ik}}. \quad (17)$$

Для всіх відстаней вимірних з будь-якої точки на точку з номером нуль, рівняння (16) прийме вигляд:

$$v_{x_m^{ik}} = -\delta y^i + p_m - d + l_{x_m^{ik}}, \quad (18)$$

де p_m - в цьому випадку невідоме систематичне зміщення вимірюваної довжини внесене відбивачем з номером m , який було встановлено на точці з номером нуль.

Таким чином, в матричній формі рівняння поправок будуть мати вигляд:

$$V_x = A_y \cdot \delta y + A_p \cdot p + A_d \cdot d + l, \quad (19)$$

де A_y - матриця коефіцієнтів лінійних рівнянь поправок при невідомих значеннях вимірюваної довжини ліній польового компаратора;

A_d - матриця коефіцієнтів лінійних рівнянь поправок при невідомому систематичному зміщенні, яке вносить у вимірювану довжину тахеометр, яким калібрується компаратор;

A_p - матриця коефіцієнтів лінійних рівнянь поправок при систематичних зміщеннях, які вносять у вимірювану довжину відбивачі з комплекту польового компаратора;

δy - вектор-стовпчик поправок до наближених значень довжини ліній польового компаратора;

d - систематичне зміщення, яке вносить у вимірювану довжину тахеометр;

p - вектор-стовпчик систематичних зміщень, які вносять у вимірювану довжину відбивачі з комплекту польового компаратора;

l - вектор-стовпчик вільних членів лінійних рівнянь;

V_x - діагональна матриця поправок до вимірних значень віддалей, вимірних тахеометром на польовому компараторі.

В загальному випадку матриця коефіцієнтів і вектор вільних членів нормальних рівнянь мають вигляд:

$$N = A^T W A = \begin{bmatrix} A_y^T W A_y & A_y^T W A_p & A_y^T W A_d \\ A_p^T W A_y & A_p^T W A_p & A_p^T W A_d \\ A_d^T W A_y & A_d^T W A_p & A_d^T W A_d \end{bmatrix}; \quad (20)$$

$$L = A^T W l = \begin{bmatrix} A_y^T W l \\ A_p^T W l \\ A_d^T W l \end{bmatrix}. \quad (21)$$

де W - матриця ваг вимірних значень приростків довжини ліній польового компаратора.

$$W = \begin{bmatrix} W_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_n \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\text{де } W_0 = \begin{bmatrix} w_{x_m^{01}} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & w_{x_m^{0k}} \end{bmatrix};$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} w_{x_m^{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & w_{x_m^{1k}} \end{bmatrix}; \quad W_i = \begin{bmatrix} w_{x_m^{i1}} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & w_{x_m^{ik}} \end{bmatrix}; \quad W_n = \begin{bmatrix} w_{x_m^{n1}} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & w_{x_m^{nk}} \end{bmatrix},$$

$$\text{де } w_{x_m^{ik}} = \frac{u^2(x^0)}{u^2(x_m^{ik})},$$

де $m(x^0)$ - середня квадратична похибка вимірювання, для якого вага вимірювання прийнята за одиницю;

$m(x_m^{ik}) = a + b \cdot x_m^{ik}$ - середня квадратична похибка вимірювань віддалей тахеометром;

Матриця ваг використовується в тому випадку, коли вимірювання польового компаратора виконують кількома різними приладами. В такому випадку вимірювання є нерівно точними і при їх обробленні необхідно це враховувати. У випадку вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора одним тахеометром, матрицю ваг можна не застосовувати. В такому випадку рівняння (20) та (21) матимуть вигляд:

$$N = A^T A = \begin{bmatrix} A_y^T A_y & A_y^T A_p & A_y^T A_d \\ A_p^T A_y & A_p^T A_p & A_p^T A_d \\ A_d^T A_y & A_d^T A_p & A_d^T A_d \end{bmatrix}; \quad (23)$$

$$L = A^T l = \begin{bmatrix} A_y^T l \\ A_p^T l \\ A_d^T l \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Для кожної точки польового компаратора, на якій встановлюється тахеометр і проводяться вимірювання, матриця коефіцієнтів рівнянь поправок буде мати вигляд:

$$A_{y^0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} = E; \quad A_{y^1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}; \quad (25)$$

$$A_{y^2} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{y^n} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & -1 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}.$$

Якщо відбивачів буде на один менше ніж точок польового компаратора і найближчий відбивач буде мінятися місцями з тахеометром, то матриця нормальних рівнянь при невідомих систематичних зміщеннях відбивачів буде мати вигляд одиничної матриці для кожної точки де встановлювався тахеометр:

$$A_{p_m} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} = E. \quad (26)$$

Якщо відбивачів менше ніж визначуваних значень довжини ліній і вони переставлялися на різні точки польового компаратора, поки тахеометр знаходився на одній, то матриця (26) буде мати іншу структуру. Наприклад, якщо визначуваних значень довжини вісім, а відбивачів чотири:

$$A_{p_m} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Тобто, під час вимірювань з початкової точки перший відбивач встановлювався на першій і п'ятій точках, другий – на другій і шостій і т. і.

Якщо під час вимірювань застосовується лише один відбивач, то матриця нормальних рівнянь при невідомому систематичному зміщенні відбивача буде мати вигляд вектора-стовпчика:

$$A_{p_m} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Матриця коефіцієнтів при невідомому систематичному зміщенні вимірювань віддалей тахеометром на кожній точці буде мати вигляд:

$$A_d = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ \dots \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Зауважимо, якщо під час вимірювань застосовувався лише один еталонний електронний тахеометр і лише один відбивач, розрізнити систематичне зміщення, викликане тахеометром від систематичного зміщення відбивача неможливо. В такому випадку визначають їх сумісний вплив:

$$A_{d,p_m} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

Таким чином, загальна матриця нормальних рівнянь буде мати вигляд:

$$A^T W A = \begin{bmatrix} E & A_{y_1}^T & A_{y_2}^T & \dots & A_{y_n}^T \\ E & E & E & \dots & E \\ A_d^T & A_d^T & A_d^T & \dots & A_d^T \end{bmatrix} W \begin{bmatrix} E & E & A_d \\ A_{y_1} & E & A_d \\ A_{y_2} & E & A_d \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{y_n} & E & A_d \end{bmatrix}, \quad (31)$$

Або, після перемноження:

$$N = A^T W A = \begin{bmatrix} W_0 + \sum_{i=1}^n A_{y^i}^T W_i A_{y^i} & W_0 + \sum_{i=1}^n W_i A_{y^i} & 0 \\ W_0 + \sum_{i=1}^n W_i A_{y^i}^T & \sum_{i=0}^n W_i & \sum_{i=0}^n W_i A_d \\ 0 & A_d^T \sum_{i=0}^n W_i & \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^n w_{x_m^{ik}} \end{bmatrix}; \quad (32)$$

$$L = A^T W l = \begin{bmatrix} W_0 l_{x_m^{0k}} + \sum_{i=1}^n A_{y^i}^T W_i l_{x_m^{ik}} \\ \sum_{i=0}^n W_i l_{x_m^{ik}} \\ \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^n w_{x_m^{ik}} l_{x_m^{ik}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_y \\ L_p \\ L_d \end{bmatrix}. \quad (33)$$

В загальному вигляді, спрощено, систему нормальних рівнянь можна записати наступним чином:

$$N \cdot \begin{bmatrix} \delta y_i \\ p \\ d \end{bmatrix} + L = 0. \quad (34)$$

Розроблена та викладена вище методика оброблення вимірювань польового компаратора розрахована на випадок, коли стоїть завдання проконтролювати, за результатами вимірювань польового компаратора, адитивне систематичне зміщення еталонного тахеометра і відбивача. За результатами такого оброблення визначають вирівняні значення довжин ліній польового компаратора. При цьому за запропонованою методикою оброблення, вимірювання можна виконувати довільною кількістю віддалемірів і відбивачів Але, в цьому випадку матриця коефіцієнтів нормальних рівнянь (31) буде мати неповний ранг, тому для обчислення всіх невідомих, її рішення виконують через знаходження псевдооберненої матриці:

$$\begin{bmatrix} \delta y \\ p \\ d \end{bmatrix} = -N^+ \cdot L = -Q \cdot \begin{bmatrix} L_y \\ L_p \\ L_d \end{bmatrix}, \quad (35)$$

де $Q = N^+$ - матриця псевдообернена матриці нормальних рівнянь.

Розрахунок псевдо оберненої матриці будемо виконувати за допомогою її скелетного розкладання:

$$N = BC, \quad (36)$$

де N - матриця нормальних рівнянь, розміром $m \times n$,

C - складова матриця A , розміром $r \times n$, $r < n$, $rank(C) = r$,

B - матриця, розміром $m \times r$, $m > r$, $rank(B) = r$.

Будуються обернені матриці до матриць B і C :

$$C^+ = C^T (CC^T)^{-1}, \quad (37)$$

$$B^+ = (BB^T)^{-1} B^T, \quad (38)$$

Будується псевдо обернена матриця до матриці нормальних рівнянь за формулою:

$$A^+ = C^+ B^+ = C^T (CC^T)^{-1} (BB^T)^{-1} B^T. \quad (39)$$

Виконаємо розрахунок довжин ліній польового компаратора запропонованою методикою за результатами його вимірювань.

Результати вимірювань подано у табл. 2.3.1

Табл. 2.3.1 Результати вимірювань польового компаратора у м. Коломия

№ пункту стояння	№ пункту наведення	Відстань, приведена	№ відбивача
Baza	1	50,09640	1
	2	100,08190	1
	3	200,20640	1
	4	600,10890	2
	5	1000,09380	2
	6	1299,89930	2
1	Baza	50,09630	1
	2	49,98530	1
	3	150,11020	1
	4	550,01270	2
	5	949,99750	2
	6	1249,80260	2

№ пункту стояння	№ пункту наведення	Відстань, приведена до поверхні відношення	№ відбивача
2	Baza	100,08180	1
	1	49,98560	1
	3	100,12450	1
	4	500,02680	2
	5	900,01170	2
	6	1199,81770	2
3	Baza	200,20640	1
	1	150,11010	1
	2	100,12470	1
	4	399,90230	2
	5	799,88720	2
	6	1099,69270	2
4	Baza	600,10850	1
	1	550,01210	1
	2	500,02650	1
	3	399,90190	1
	5	399,98480	2
	6	699,79030	2
5	Baza	1000,09350	1
	1	949,99700	1
	2	900,01140	1
	3	799,88690	1
	4	399,98500	2
	6	299,80560	2
6	Baza	1299,89880	1
	1	1249,80260	1
	2	1199,81700	1
	3	1099,69240	1
	4	699,79030	2
	5	299,80540	2

Наближені значення параметрів вирівнювання приймемо наступним чином:

- довжини ліній польового компаратора – згідно вимірювань на базовій точці польового компаратора;

- наближені значення адитивної похибки віддалеміра тахеометра та константи відбивачів дорівнюють 0.

Вибрані значення наближених значень параметрів наведено у табл. 2.3.2.

Табл. 2.3.2 Визначені наближені значення параметрів

Назва параметру	Значення параметру
d	0
p1	0
p2	0
1	50,09640
2	100,08190
3	200,20640
4	600,10890
5	1000,09380
6	1299,89930

Коефіцієнти рівнянь поправок та матриці нормальних рівнянь наведені у табл. 2.3.3, 2.3.4 та 2.3.5.

Табл. 2.3.3 Коефіцієнти рівнянь поправок

d	p1	p2	y1	y2	y3	y4	y5	y6	l, мм
-1	1	0	1						0
-1	1	0		1					0
-1	1	0			1				0
-1	0	1				1			0
-1	0	1					1		0
-1	0	1						1	0
-1	1	0	1						0,1
-1	1	0	-1	1					0,2
-1	1	0	-1		1				-0,2
-1	0	1	-1			1			-0,2
-1	0	1	-1				1		-0,1
-1	0	1	-1					1	0,3
-1	1	0		1					0,1
-1	1	0	-1	1					-0,1
-1	1	0		-1	1				0
-1	0	1			-1	1			0,2
-1	0	1			-1		1		0,2
-1	0	1			-1			1	-0,3
-1	1	0			1				0
-1	1	0	-1		1				-0,1
-1	1	0		-1	1				-0,2
-1	0	1			-1	1			0,2
-1	0	1				-1	1		0,2
-1	0	1					-1	1	0,2
-1	1	0				1			0,4
-1	1	0	-1			1			0,4
-1	1	0		-1		1			0,5
-1	1	0			-1	1			0,6

-1	0	1				-1	1		0,1
-1	0	1				-1		1	0,1
-1	1	0					1		0,3
-1	1	0	-1				1		0,4
-1	1	0		-1			1		0,5
-1	1	0			-1		1		0,5
-1	0	1				-1	1		-0,1
-1	0	1					-1	1	-0,1
-1	1	0						1	0,5
-1	1	0	-1					1	0,3
-1	1	0		-1				1	0,4
-1	1	0			-1			1	0,5
-1	0	1				-1		1	0,1
-1	0	1					-1	1	0,1

Табл. 2.3.4 Матриця нормальних рівнянь

42	-24	-18	8	4	0	-4	-8	-12
-24	24	0	-5	-1	3	4	4	4
-18	0	18	-3	-3	-3	0	4	8
8	-5	-3	12	-2	-2	-2	-2	-2
4	-1	-3	-2	12	-2	-2	-2	-2
0	3	-3	-2	-2	12	-2	-2	-2
-4	4	0	-2	-2	-2	12	-2	-2
-8	4	4	-2	-2	-2	-2	12	-2
-12	4	8	-2	-2	-2	-2	-2	12

Табл. 2.3.5 Вільні члени нормальних рівнянь

-6
5,1
0,9
-0,8
-1,1
-2,7
1,9
2
2,1

Як було описано вище, псевдообернена матриця знаходилась за допомогою знаходження обернених матриць скелетного розкладання матриці нормальних рівнянь. Отримана псевдообернена матриця показана у табл. 2.3.6.

Табл. 2.3.6. Псевдообернена матриця

0,40384	-0,19101	-0,21283	0,50875	0,69608	0,88341	1,06706	1,24949	1,44639
0,34099	0,13730	-0,20368	0,47545	0,62948	0,78350	0,94341	1,10527	1,28160
0,33070	-0,19215	0,13855	0,48819	0,65494	0,82170	0,96863	1,10895	1,26373
0,01796	-0,01534	-0,00261	0,15237	0,09046	0,09997	0,10676	0,11263	0,11851
0,03591	-0,03069	-0,00522	0,09046	0,18092	0,12852	0,14209	0,15384	0,16559
0,05387	-0,04603	-0,00784	0,09997	0,12852	0,22849	0,17742	0,19505	0,21268
0,07403	-0,04962	-0,02440	0,10676	0,14209	0,17742	0,27877	0,23547	0,26359
0,09492	-0,04930	-0,04563	0,11263	0,15384	0,19505	0,23547	0,34705	0,31578
0,11582	-0,04897	-0,06685	0,11851	0,16559	0,21268	0,26359	0,31578	0,43940

Таким чином, результати вирівнювання та вирівняні значення невідомих параметрів показано в табл. 2.3.7

Назва параметру	Поправка, мм	Вирівняне значення, м
d	-0,42	-0,00042
p1	-0,58	-0,00058
p2	-0,29	-0,00029
1	0,00	50,09640
2	0,07	100,08197
3	0,23	200,20663
4	-0,11	600,10879
5	-0,16	1000,09364
6	-0,20	1299,89910

2.4 Оцінка точності результатів вирівнювання вимірювань

Оцінка точності вимірювань при визначенні метрологічних характеристик польового компаратора виконується за результатами вирівнювання вимірювань методом найменших квадратів.

При використанні кількох еталонних тахеометрів, оцінку точності можна виконати за наступною формулою:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n w_{x_m^{ik}} \cdot v_{x_m^{ik}}^2}{r}}, \quad (40)$$

При використанні лише одного електронного тахеометра для визначення метрологічних характеристик польового компаратора, як в нашому випадку, оцінку точності можна виконати наступним чином:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_{x_m^{ik}}^2}{r}}, \quad (41)$$

де $v_{x_m^{ik}}$ - поправки до наближених значень,

r - кількість ступенів свободи під час вирівнювання,

$$r = n \cdot (n - 1) - k - 1, \quad (42)$$

n – кількість пунктів польового компаратора,

k – кількість відбивачів.

Тоді середні квадратичні похибки визначення параметрів вирівнювання, а саме адитивної складової похибки тахеометра, константи призми та довжин ліній польового компаратора, приведених до поверхні відношення можна визначити за наступними формулами:

$$m_d = S \cdot \sqrt{Q_{d_{jj}}}, \quad (43)$$

$$m_p = S \cdot \sqrt{Q_{p_{mm}}}, \quad (44)$$

$$m_{y_i} = S \cdot \sqrt{Q_{y_{ii}}}, \quad (45)$$

де $Q_{y_{ii}}$, $Q_{p_{mm}}$, $Q_{d_{jj}}$ - діагональні члени, відповідно, першого, другого і третього діагональних блоків матриці псевдооберненої до матриці нормальних рівнянь (34).

Результати обчислення оцінки точності показано у табл. 2.3.8

Табл. 2.3.8 Оцінка точності визначення параметрів польового компаратора

Назва параметру	Значення параметру, мм
СКП одиниці ваги S	0,14
d	0,09
p1	0,05
p2	0,05
1	0,05
2	0,06
3	0,07
4	0,07
5	0,08
6	0,09

2.5 Визначення довжин ліній польового компаратора

Використання значень довжин ліній польового компаратора до поверхні відношення під час перевірки та калібрування віддалемірів є незручним, оскільки вимагає значної кількості зайвих обчислень. Таким

чином, визначені значення довжин ліній,приведених до поверхні відношення необхідно змінити, а саме привести їх довжини до центрів пунктів польового компаратора. Для цього необхідно зробити перетворення, обернені до обчислень, виконаних у пункті 2.2. Визначені значення довжин ліній на поверхні відношення у польового компаратора необхідно привести на середню висоту компаратора та визначити нахилені відстані між центрами пунктів польового компаратора. При цьому такі перетворення необхідно робити в протилежному напрямі, тобто спочатку визначати довжини ліній польового компаратора для його середньої висоти за формулою:

$$D_i = D_i^0 + \frac{H_m}{R} D_i^0 + \frac{H_m^2}{R^2} D_i^{0^2}, \quad (46)$$

А потім визначати нахилені відстані між пунктами польового компаратора за формулою:

$$S_i = \frac{D_i}{\cos v'_i}, \quad (47)$$

де v'_i - кут нахилу між пунктами польового компаратора.

Оскільки електронні тахеометри та інші віддалеміри, які проходять повірку або калібрування на польовому компараторі можуть мати різну висоту, то виникає задача врахування висоти приладу на результати його вимірювань. Різні висоти додатково можуть мати і відбивачі, що використовуються під час вимірювань віддалей електронними тахеометрами. Таким чином поправка у виміряне значення довжини лінії під час вимірювань тахеометрів та інших віддалемірів на польовому компараторі може бути визначена за формулою:

$$S'_i = S_i - \Delta h \sin v'_i, \quad (48)$$

де Δh – різниця висот електронного тахеометра та відбивача.

Результати обчислень еталонних значень довжин ліній польового компаратора для повірки та калібрування електронних тахеометрів та віддалемірів наведено у табл. 2.5.1

Табл. 2.5.1 Протокол вимірювань електронних тахеометрів на польовому компараторі у м. Коломия

Обробка результатів вимірювання віддалей тахеометром на польовому компараторі КП-7

Назва лінії	Виміряна віддаль $S_{вим.}$, м	Постійна поправка Δ_c , м	Циклічна поправка $\Delta_{ц.}$, м	Поправка за зов. умови $\Delta_{р.т.}$, м	Δh , м	$\cos ZE$	Приведена віддаль S_0 , м	Дійсна віддаль S , м	$\Delta s = S_0 - S$ мм
База-С1		50,1291			0,220	-0,0001	0,0000	50,1291	0,0
База-С2		50,1291			0,220	0,0015	0,0000	100,1169	0,0
База-С3		50,1291			0,220	0,0014	0,0000	200,2467	0,0
База-С4		50,1291			0,220	0,0000	0,0000	600,1716	0,0
База-С5		50,1291			0,220	0,0035	0,0000	1000,1768	0,0
База-С6		50,1291			0,220	0,0035	0,0000	1299,9981	0,0
Середня квадратична похибка вимірювання віддалей $m_s = [0,0 + 0,0 \cdot S(\text{км})] \text{мм}$									

$S_0 = S_{вим.} + \Delta_c + \Delta_{р.т.} - \Delta h \cdot \cos ZE$, де $\Delta h = h_{отр} - h_{max}$

GISUT KNUCA 2023

Розділ 3. Модернізація польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС приймачів

3.1 Розроблення схеми модернізації польового компаратора для забезпечення повірки та калібрування ГНСС-приймачів

У 2020 р. ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» вирішили створити польовий компаратор, з метою можливості повірки та калібрування на ньому ГНСС-приймачів. Станом на 2020 р., ДП «Івано-Франківськстандартметрологія» вже мав польовий компаратор, призначений для повірки та калібрування геодезичних віддалемірів, розташований у м. Коломия. Таким чином, було вирішено створювати компаратор для повірки ГНСС-приймачів на базі вже існуючого компаратора, шляхом його модернізації.

Польовий компаратор до модернізації представлений на рис. 3.1

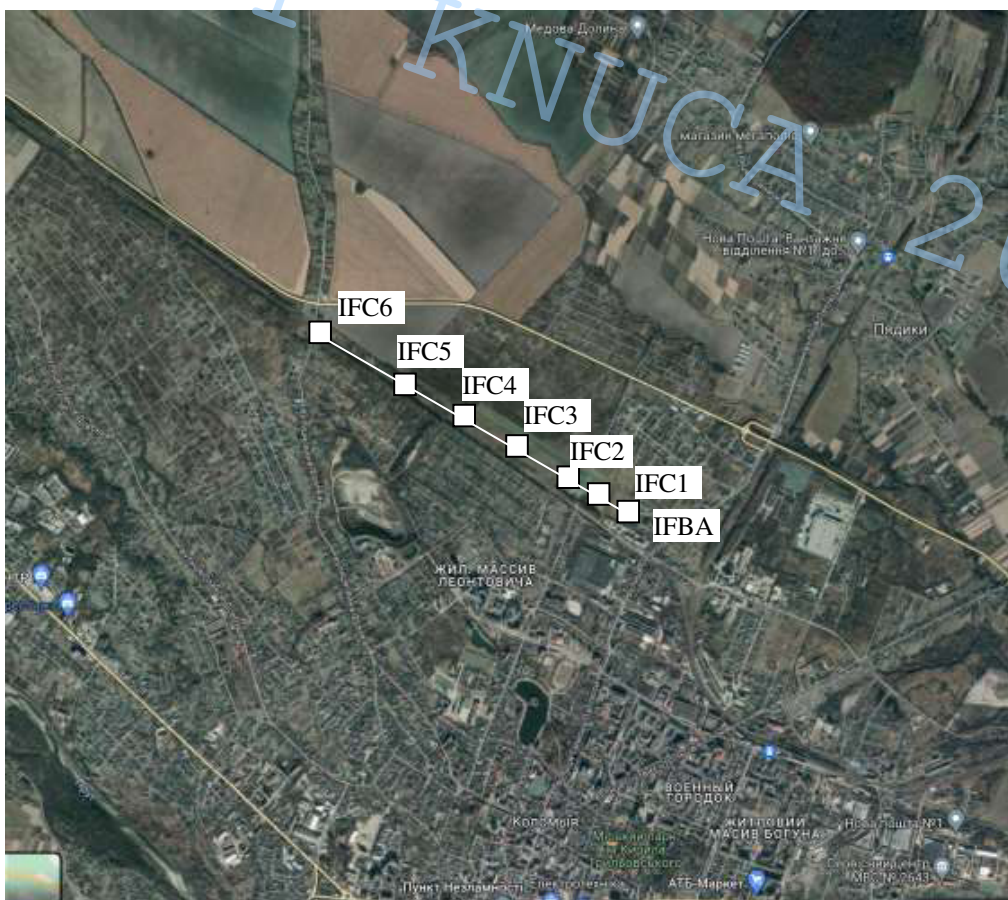


Рис. 3.1 Польовий компаратор м. Коломия станом на 2020 р.

На основі цих вихідних даних запропонований порядок створення польового компаратора для повірки та калібрування ГНСС-приймачів у м. Коломия. Було розроблено перелік вимог до створення нового еталону:

1. Максимальне використання існуючого польового компаратора
2. Забезпечення проведення мінімальної кількості будівельних робіт;
3. Забезпечення необхідної точності польового компаратора;
4. Забезпечення необхідного діапазону вимірювань польового компаратора
5. Забезпечення виконання вимірювань ГНСС-приймачів по різних азимутах.

Пояснимо деякі з цих пунктів докладніше. Польовий компаратор, який створюється повинен мати змогу виконання повірки та калібрування більшості типів ГНСС-приймачів. Зазвичай точність вимірювань ГНСС приймачів у плані складає $3 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$. Таким чином, середня квадратична похибка визначення довжин баз польового компаратора не повинна перевищувати $1 \text{ мм} + 0,2 \text{ ppm}$. Тобто, СКП визначення довжин ліній у межах до 1 км не повинна перевищувати 1 мм, для довжин ліній 2 км – не більше 1,5 мм, 3 км – не більше 1,6 мм, тощо. Для забезпечення таких вимог щодо точності вимірювань, нами було вирішено визначати значення довжин ліній польового компаратор наступним чином:

1. короткі відстані (до 1,5 км) – шляхом застосування високоточного електронного тахеометра LEICA TS50;
2. довгі відстані (більше 1,5 км) – шляхом проведення тривалих (до 6 годин) статичних вимірювань комплектом ГНСС-приймачів Sokkia GRX2.

Іншою проблемою створення польового компаратора для повірки та калібрування ГНСС-приймачів є забезпечення необхідного діапазону їх вимірювань. Згідно [2] польовий компаратор повинен забезпечувати щонайменше третину діапазону вимірювань віддалемірів. Проектуючи такі

вимоги до ГНСС-приймачів, визначимо бажаний діапазон довжин ліній такого польового компаратора. Згідно технічної літератури, бажаний діапазон вимірювань ГНСС-приймачів складає до 20 км, оскільки при більших відстанях при обробленні результатів вимірювань необхідно використовувати параметри різних слоїв атмосфери. Таким чином, визначаємо, що польовий компаратор повинен мати довжини баз до 6 км.

На основі наведеного переліку вимог нами було запроєктовано створення польового компаратора для повірки та калібрування ГНСС-приймачів за наступною схемою (рис. 3.2)

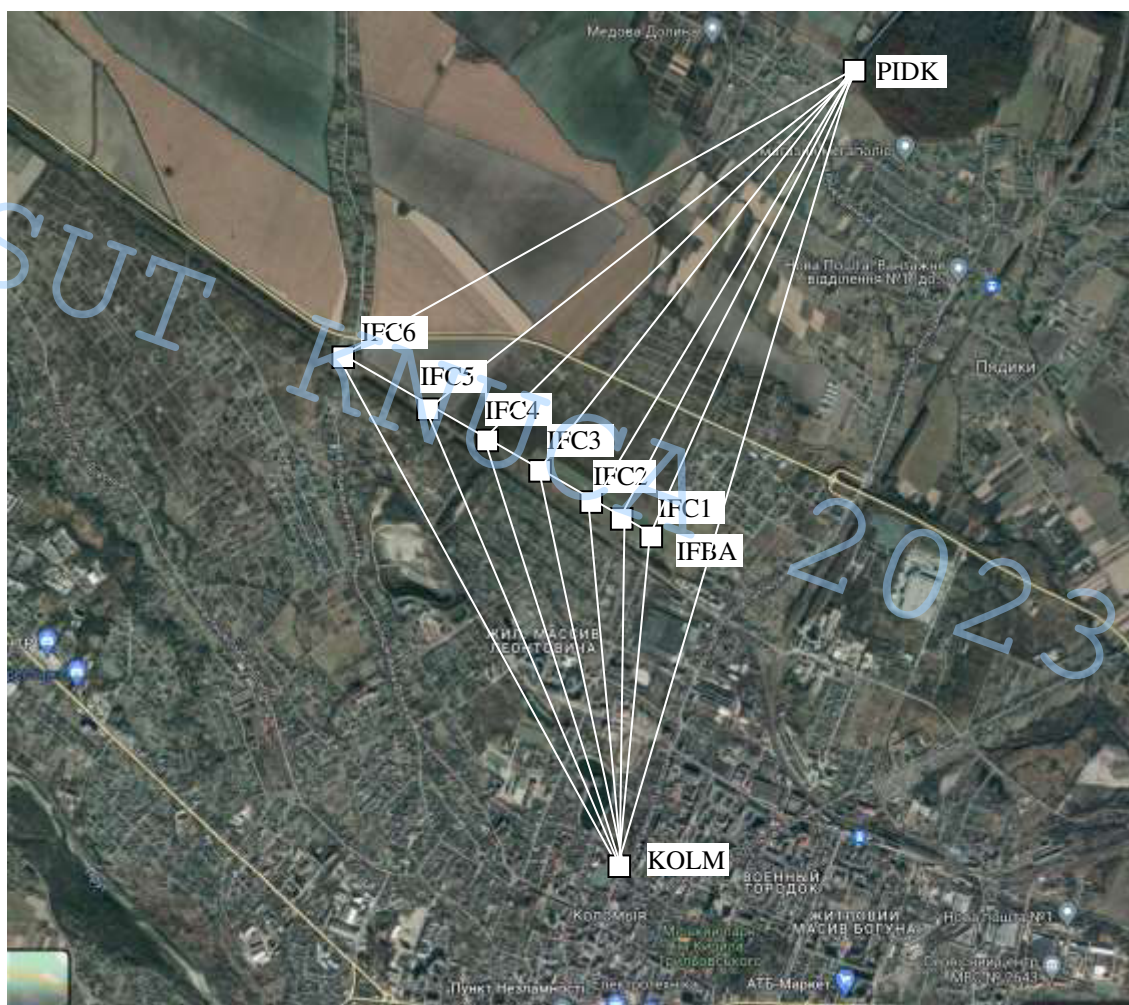


Рис. 3.2 Схема модернізації польового компаратора

Польовий компаратор буде призначений для повірки та калібрування ГНСС-приймачів у статичному режимі та в режимі RTK. Для першого варіанту досліджень визначаються значення довжин баз та перевищень

польового компаратору. Для другого варіанту досліджень будуть визначені координати пунктів польового компаратора в системі координат УСК-2000.

3.2 Супутникові вимірювання при контролі метрологічних характеристик польового компаратора

Методи виконання супутникових вимірювань вибирають залежно від поставлених завдань до знімання, необхідної точності вимірювань та її мети. Загалом, найбільш часто застосовуваними є наступні методи виконання супутникових вимірювань:

1. Статичний метод;
2. Кінематичний метод;
3. Метод RTK.

Розглянемо кожний з цих методів детальніше.

Статичний метод

Є найбільш точним методом виконання супутникових вимірювань. За цим методом на двох або більше пунктах встановлюються ГНСС приймачі та виконують запис вимірювань у пам'ять супутника протягом тривалого часу.

Мінімальна необхідна кількість супутників під час вимірювань – 4. Тривалість вимірювань залежить від багатьох параметрів та може значно різнитись в різних роботах.

На час вимірювань впливають наступні параметри:

1. Відстань між пунктами, на яких виконують вимірювання;
2. Кількість супутників під час вимірювань;
3. Геогеометричне розташування супутників (фактор GDOP/PDOP);
4. Тип ГНСС-приймачів;

5. Інтервал запису вимірювань;
6. Вимоги щодо точності вимірювань;
7. Різних чинників навколишнього середовища.

Загальна схема виконання статичного знімання показана на рис. 3.3

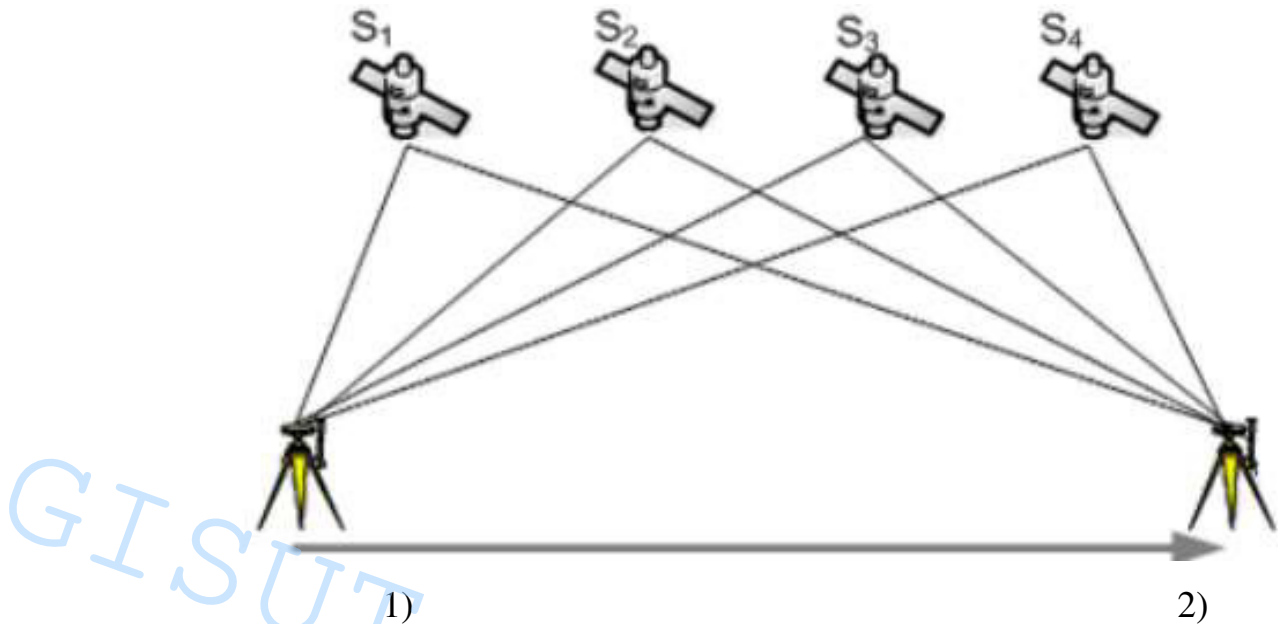


Рис.3.3 Принципова схема виконання статичних вимірювань.

Кінематичний метод

В такому методі вимірювань один із приймачів використовується в якості базового. Він встановлюється на пункті з відомими координатами та виконує вимірювання супутників. Окрім стандартної інформації від супутників, базовий приймач додатково визначає навігаційні поправки, які дозволяють точно визначати положення іншого приймача відносно базового. Інші ГНСС-приймачі використовуються у якості роверів – встановлюються на інших точках на короткий проміжок часу. В спеціалізованому програмному забезпеченні, після завантаження всіх вимірювань, можливо визначити координати всі роверних точок.

Метод RTK

Сучасні ГНСС-приймачі мають вбудоване програмне забезпечення, яке може самостійно виконувати необхідні обчислення в на місцевості під час самих вимірювань визначати координати роверних точок. В такому випадку під час вимірювань встановлюється зв'язок між базовим і роверним ГНСС-приймачами. Поправки можуть передаватись радіозв'язком або через мережу мобільного зв'язку. Цей метод є модифікацією кінематичного методу, називається методом RTK та дослівно перекладається як кінематика реального часу.

Останнього часу в Україні було створено кілька RTK-мереж. В таких мережах, по території держави рівномірно розташовують пункти з визначеними координатами, на яких встановлені ГНСС приймачі, які постійно виконують вимірювання в статичному режимі та визначають поправки для режиму RTK. Кожен користувач може за підпискою підключитись до довільного пункту такої мережі та виконати вимірювання, використовуючи як поправки дані із приймачів цієї мережі. Найбільш відомими RTK мережами на цей час є System.net, ZAKPOS, КІЗВ.

Розвиток геодезичних технологій призвів до переважного використання статичного та RTK методів виконання супутникових вимірювань. Таким чином, польовий компаратор повинен забезпечувати можливість перевірки та калібрування ГНСС-вимірювань у цих двох режимах.

Як було вказано у п. 3.1 визначення метрологічних характеристик польового компаратора виконувалось за допомогою комбінації методів лінійно-кутової мережі та статичного методу супутникових вимірювань. При виконанні супутникових вимірювань, додатково використовували добові файли вимірювань з чотирьох найближчих постійних пунктів ГНСС-мережі System.net. Відстань від пунктів мережі System.net не перевищувала 25 км.

Параметри виконання вимірювань:

- кількість сесій спостереження – 9;
- кількість опорних пунктів перманентних геодезичної мережі, не менше – 4;
- кількість прийомів, не менше – 2;
- тривалість кожної сесії – 30-34 години;
- інтервал реєстрації даних – 1 або 5 секунд (рівно);
- інтервал визначення метеопараметрів через кожні – 2-4 години;
- інтервал перезапису даних з приймачів на комп'ютер – не менше 30-34 годин (кількість даних, які може помістити приймач за одні сесію залежить від кількості пам'яті та інтервалу реєстрації даних);
- файли вимірювань повинні зберігатись у форматі Rinex;
- вимірювання під час кожної сесії вимірювань подано у табл. 3.1

використання при апостеріорній обробці орбіт: (в системі WGS-84) для попередніх обчислень, наукові від IGS служби (в системі ITRF, похибка 10 см) для остаточної обробки.

Табл. 3.1 Супутникові вимірювання на пунктах польового компаратора

Номер приймача	Номер сесії і її тривалість				
	1 6ч.	2 2ч.	3 2ч.	4 4ч.	5 4ч.
1	KOLM	KOLM	KOLM	KOLM	PIDK
2	IFBA	IFC3	IFC4	IFC6	IFC6
	6 2ч.	7 2ч.	8 6ч.	9 6ч.	
1	PIDK	PIDK	PIDK	PIDK	
2	IFC4	IFC3	IFBA	KOLM	

Вимірювання повинні виконуватись багаточастотними ГНСС-приймачами Sokkia GRX2/ На рис. 3.4 показано ГНСС-приймачі які застосовувались під час вимірювань польового компаратора.



Рис.3.4. ГНСС-приймачі Sokkia GRX2

3.3 Оброблення супутникових спостережень

Визначення координат геодезичних знаків польового компаратора в системі координат УСК-2000 виконуються за методикою:

1. кожен пункт визначається за допомогою двох різних прийомів;
2. кожен трикутник визначається безпосередньо;
3. всі короткі бази визначаються безпосередньо;
4. бази KOLM – IFBA, PIDK – IFBA, KOLM – PIDK визначаються двічі;

Під час оброблення супутникових вимірювань виконують наступні процеси:

- визначення окремих векторів та подальше об'єднання їх в мережі;
- визначення результатів сесій, отриманих одночасно для багатьох станцій вимірювань;
- обробка вимірювань, виконаних у різних сесіях.

Оброблення результатів супутникових вимірювань виконують в програмному забезпеченні Magnet Tools. На першому етапі виконують аналіз всіх супутникових вимірювань та виключають вимірювання тих супутників, сигнал від яких був нестійким або переривчастим. Процес такого оброблення показаний на рис. 3.5 та 3.6.

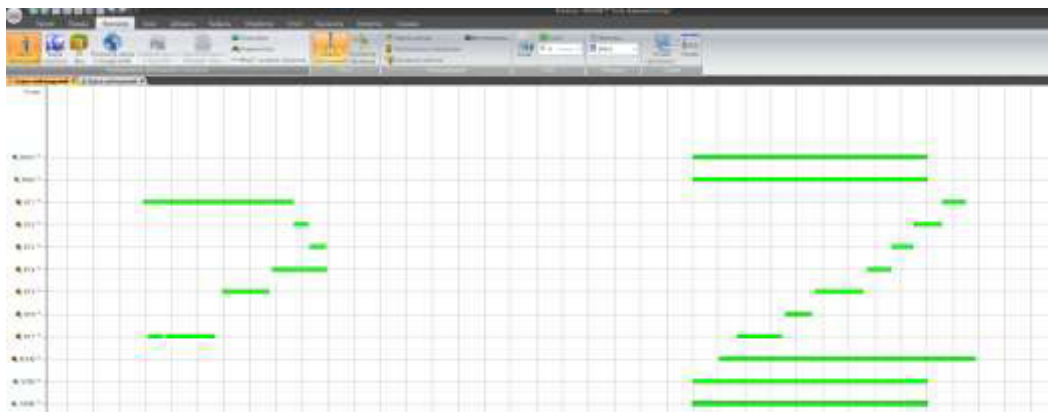


Рис. 3.5 Огляд сеансів спостережень



Рис. 3.6 Аналіз спостережень супутників

На другому етапі виконуємо попереднє оброблення вимірювань, визначаємо довжини баз векторів, вирішуємо навігаційну задачу для кожної станції вимірювань.

Для переконання точності визначення координат, перевіряємо їх декількома способами:

- шляхом замикання трикутників (визначення нев'язок в трикутниках);
- шляхом визначення параметрів однієї й то їж самої бази для різності сесій або відрізка сесії (визначення повторюються в незалежних даних).

Виконуємо контроль величин з використанням орбіт IGS, вони не повинні перевищувати допустимі значення які наведені в таблиці 3.2

Табл. 3.2 Допустимі величини розходжень під час оброблення супутникових вимірювань

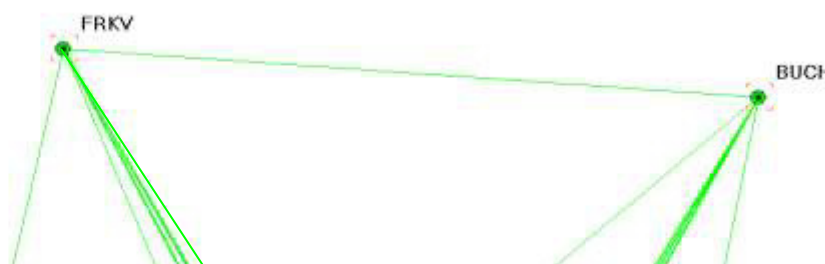
	Величина, що контролюється	Нев'язка	повторюваність
1	висотна компонента вектора, мм, не більше	$\pm 5 - 10$	± 20
2	широтна компонента вектора, мм, не більше	$\pm 3 - 5$	± 6
3	довготна компонента вектора, мм, не більше	$\pm 4 - 6$	± 8
4	довжина вектора (довжина бази), мм, не більше	$\pm 2 - 4$	± 4

Наступним нашим кроком буде попередня обробка результатів зйомки та вирівнювання мережі. У результаті отримаємо звіт з приростами координат X, Y та H для кожного сеансу спостережень, який відображений в табл. 3.3.

Координати вихідних пунктів опорної геодезичної мережв показані в табл.3.3.

Табл. 3.3 Координати вихідних пунктів

Контрольні точки			
Назва	X (м)	Y (м)	Z (м)
BUCH	5421145,360	5378874,778	343,104
FRKV	5424493,296	5331192,040	272,405
VYZN	5347216,120	5363878,505	353,776
YARM	5371241,078	5318709,451	547,725



GISUT
KNUCA
2023

Рис. 3.7 Схема геодезичної мережі при визначенні координат пунктів польового компаратора

Результати оброблення супутникових вимірювань при визначенні координат пунктів польового компаратора в системі координат УСК-2000 наведена в табл.. 3.4

Табл. 3.4 Результати оброблення результатів супутникових вимірювань

Назва	dN (м)	dE (м)	dHt (м)	СКП у плані	СКП по висоті
BUCH-FRKV	3347,998	-47682,568	-70,852	0,019	0,026
BUCH-IFC2	-39484,102	-22926,160	-47,969	0,016	0,025
BUCH-IFC3	-39454,781	-22966,808	-47,525	0,016	0,0285
BUCH-IFC4	-39395,541	-23047,392	-47,277	0,019	0,0274
BUCH-IFC5	-39159,293	-23370,210	-45,410	0,019	0,023
BUCH-IFC6	-38922,996	-23693,120	-43,903	0,017	0,022
BUCH-IFC7	-38746,079	-23935,208	-42,985	0,007	0,023
BUCH-KOLM	-42217,039	-23564,085	-46,399	0,008	0,025
BUCH-KOLM	-42217,019	-23564,111	-46,288	0,015	0,024
BUCH-VYZN	-73928,907	-14996,285	9,188	0,016	0,022
BUCH-YARM	-49903,971	-60165,115	203,422	0,015	0,024
FRKV-IFC2	-42831,983	24756,247	22,823	0,018	0,022
FRKV-IFC3	-42802,627	24716,035	23,208	0,019	0,025
FRKV-IFC4	-42743,456	24635,233	23,626	0,011	0,021
FRKV-IFC5	-42507,338	24312,289	25,454	0,018	0,033
FRKV-IFC6	-42271,034	23989,458	26,843	0,019	0,028
FRKV-IFC7	-42094,046	23747,231	27,827	0,018	0,037
FRKV-KOLM	-45565,036	24118,483	24,533	0,021	0,021
FRKV-KOLM	-45564,899	24118,526	24,393	0,012	0,021
FRKV-VYZN	-77276,897	32686,272	80,045	0,008	0,024
FRKV-YARM	-53251,956	-12482,592	274,241	0,012	0,018
IFC1-IFC4	118,290	-161,625	0,715	0,001	0,001
IFC1-IFC5	354,514	-484,428	2,368	0,001	0,001
IFC1-IFC7	767,749	-1049,394	4,724	0,001	0,001
IFC1-IFC7	767,747	-1049,393	4,724	0,001	0,001
IFC1-KOLM	-2703,179	-678,269	1,446	0,002	0,002
IFC2-IFC4	88,683	-121,159	0,505	0,001	0,001
IFC2-KOLM	-2732,792	-637,804	1,249	0,001	0,002

IFC2-VYZN	-34444,522	7929,833	56,597	0,015	0,024
IFC2-YARM	-10419,826	-37239,026	251,073	0,016	0,024
IFC3-IFC4	59,257	-80,736	0,356	0,001	0,001
IFC3-KOLM	-2762,219	-597,376	1,093	0,001	0,002
IFC3-VYZN	-34474,056	7970,480	56,590	0,014	0,022
IFC3-YARM	-10449,273	-37198,460	250,997	0,015	0,025
IFC4-KOLM	-2821,481	-516,643	0,735	0,002	0,003
IFC4-VYZN	-34533,324	8051,095	56,150	0,014	0,021
IFC4-YARM	-10508,498	-37117,800	250,537	0,022	0,026
IFC5-KOLM	-3057,696	-193,842	-0,904	0,002	0,004
IFC5-VYZN	-34769,600	8374,031	54,562	0,014	0,025
IFC5-YARM	-10744,677	-36794,922	248,876	0,018	0,023
IFC6-KOLM	-3293,935	129,052	-2,290	0,002	0,003
IFC6-VYZN	-35005,822	8696,871	53,256	0,013	0,022
IFC6-YARM	-10980,861	-36471,933	247,538	0,016	0,025
IFC7-KOLM	-3470,940	371,121	-3,264	0,001	0,002
IFC7-VYZN	-35182,867	8938,707	52,282	0,010	0,025
IFC7-YARM	-11157,914	-36229,916	246,412	0,015	0,025
KOLM-VYZN	-31711,915	8567,715	55,532	0,013	0,017
KOLM-VYZN	-31711,854	8567,765	55,420	0,013	0,021
KOLM-YARM	-7687,012	-36601,157	249,829	0,015	0,024
KOLM-YARM	-7686,962	-36601,056	249,744	0,016	0,023
VYZN-YARM	24024,936	-45168,814	194,203	0,020	0,028

Таким чином, в результаті вирівнювання супутникових вимірювань, отримані довжини баз та перевищення між пунктами польового компаратора та координати його пунктів в системі координат УСК-2000.

Відхилення між значеннями довжин баз і перевищень між пунктами польового компаратора для перевірки та калібрування віддалемірів, визначені методами лінійно-кутової мережі та супутниковим методом не перевищили

1мм. В якості еталонних значень були прийняті значення довжин баз і перевищень визначені за лінійно-кутовим методом за допомогою електронного тахеометра.

Оскільки координати пунктів польового компаратора будуть використовуватись для перевірки та калібрування ГНСС-приймачів в режимі RTK, за координати пунктів використовувались координати, визначені супутниковим методом у статичному режимі, оскільки точність їх визначення цілком задовольняє вимоги щодо точності їх визначення. Н

В табл. 3.5 та 3.6 представлені результати вимірювань довжин баз та координат пунктів супутниковим методом.

Табл. 3.5 Довжини баз базисів полого компаратора в м. Коломия

Назва лінії	Довжина лінії, м
<i>IFC1-IFC2</i>	<i>50,1291</i>
<i>IFC1-IFC3</i>	<i>100,1169</i>
<i>IFC1-IFC4</i>	<i>200,2467</i>
<i>IFC1-IFC5</i>	<i>600,1716</i>
<i>IFC1-IFC6</i>	<i>1000,1768</i>
<i>IFC1-IFC7</i>	<i>1299,9981</i>
<i>KOLM-IFC1</i>	<i>2786,4102</i>
<i>KOLM-IFC2</i>	<i>2805,6560</i>
<i>KOLM-IFC3</i>	<i>2825,4927</i>
<i>KOLM-IFC4</i>	<i>2867,7968</i>
<i>KOLM-IFC5</i>	<i>3063,2066</i>
<i>KOLM-IFC6</i>	<i>3295,7796</i>
<i>KOLM-IFC7</i>	<i>3489,9979</i>
<i>IFC4-IFC6</i>	<i>799,9340</i>
<i>IFC4-IFC7</i>	<i>1099,7449</i>
<i>PIDK-IFC1</i>	<i>2950,2670</i>
<i>PIDK-IFC2</i>	<i>2906,0368</i>
<i>PIDK-IFC3</i>	<i>2862,1850</i>
<i>PIDK -IFC4</i>	<i>2774,7765</i>
<i>PIDK -IFC5</i>	<i>2435,7867</i>
<i>PIDK -IFC6</i>	<i>2118,1540</i>
<i>PIDK -IFC7</i>	<i>1900,6648</i>
<i>PIDK - KOLM</i>	<i>5391,0745</i>

Табл. 3.6 Координати пунктів польового компаратора у м. Коломия

Назва	Дійсні координати пунктів
-------	---------------------------

<i>пункту</i>	<i>X₀, м</i>	<i>Y₀, м</i>	<i>H₀, м</i>
<i>IFC1</i>	<i>5381631,3290</i>	<i>5355988,9665</i>	<i>296,8268</i>
<i>IFC2</i>	<i>5381660,9359</i>	<i>5355948,5006</i>	<i>297,0303</i>
<i>IFC3</i>	<i>5381690,3592</i>	<i>5355908,0754</i>	<i>297,1839</i>
<i>IFC4</i>	<i>5381749,6178</i>	<i>5355827,3416</i>	<i>297,5387</i>
<i>IFC5</i>	<i>5381985,8402</i>	<i>5355504,5404</i>	<i>299,1898</i>
<i>IFC6</i>	<i>5382222,0783</i>	<i>5355181,6461</i>	<i>300,5895</i>
<i>IFC7</i>	<i>5382399,0784</i>	<i>5354939,5720</i>	<i>301,5620</i>
<i>KOLM</i>	<i>5378928,1481</i>	<i>5355310,6979</i>	<i>298,1945</i>
<i>PIDK</i>	<i>5384284,3265</i>	<i>5354698,3879</i>	<i>287,5401</i>

Визначені таким чином довжини баз ліній та координати пунктів польового компаратора можуть бути використані для перевірки та калібрування ГНСС-приймачів в статичному режимі та режимі RTK.

Згідно з результатами, було отримано значну кількість ліній у діапазоні приблизно 2 км, проте для виконання перевірки приладів така кількість довжин ліній не є необхідною. Таким чином, було виконано відбір ліній польового компаратора для забезпечення максимального покриття діапазону вимірювань приладів при одночасній мінімальній кількості вимірювань. Запропоновані нами довжини ліній, які необхідно прийняти та еталонні під час проведення перевірки та калібрування ГНСС-приймачів наведено у табл. 3.7.

Табл. 3.7 Еталонні значення довжин ліній польового компаратора у м.

Коломия

Назва лінії	Довжина лінії, м
<i>IFC1-IFC2</i>	<i>50,1291</i>
<i>IFC1-IFC3</i>	<i>100,1169</i>
<i>IFC1-IFC4</i>	<i>200,2467</i>
<i>IFC1-IFC5</i>	<i>600,1716</i>
<i>IFC1-IFC7</i>	<i>1299,9981</i>
<i>KOLM-IFC1</i>	<i>2786,4102</i>
<i>KOLM-IFC7</i>	<i>3489,9979</i>
<i>PIDK -IFC7</i>	<i>1900,6648</i>
<i>PIDK - KOLM</i>	<i>5391,0745</i>

Розділ 4. Дослідження стабільності метрологічних характеристик польових компараторів

4.1 Аналіз проблем створення та утримання польових компараторів

Загалом польові компаратори представляють собою набір з деякої кількості пунктів, між якими з дуже високою точністю визначено відстані, напрямки, перевищення, прирости координат, тощо. Тип вимірних даних залежить від призначення польового компаратора. У нашому випадку, для польового компаратора визначено еталонні значення довжин ліній та приростків координат.

Незалежно від типу польового компаратора та його призначення до нього висувається перелік вимог, головними серед яких є забезпечення вимірювань на польовому компараторі приладів, що повіряються і калібруються, та забезпечення високої точності вимірювань метрологічних характеристик польового компаратора. Забезпечення цих вимог виконують через виконання цілого ряду процесів, а саме:

1. Перевірка стабільності пунктів польового компаратора у часі та під впливом зовнішніх чинників, наприклад температурні деформації, нерівномірних прогрівів пунктів, вітрове навантаження, деформації земної поверхні, антропогенний фактор, та інше;
2. Забезпечення високої точності центрування приладів над пунктами польового компаратора;
3. Забезпечення вимог видимості між пунктами польового компаратора;
4. Забезпечення вимог вимірювань до геодезичних приладів, наприклад відсутність електромагнітного випромінювання під час вимірювань ГНСС приймачів, наявність «відкритого неба».

Окрім зазначених вище процесів можна згадати заходи по збереженню пунктів з часом, протидія антропогенним чинникам, вібраціям, тощо.

Розглянемо описані вище процеси докладніше.

Під дією ряду факторів, описаних вище, пункти польового компаратора можуть деформуватись або зміщуватись. Це все призводить до зміни метрологічних характеристик польового компаратора, а саме до зміни значень еталонних відстаней, кутів, перевищень, приростів координат або інших даних. Контроль метрологічних характеристик польового компаратора виконують шляхом його періодичного вимірювання. При цьому такі вимірювання проводяться відповідно до затвердженого плану-графіку виконання робіт. Зазвичай таких план-графік має наступні вимоги:

1. перший цикл - не раніше ніж через рік після закладки центрів, тобто не раніше, ніж закінчиться один цикл сезонного промерзання і відтавання ґрунту;
2. другий цикл вимірів, призначений для контролю стабільності положення центрів –ще через 1 рік;
3. третій цикл вимірювань, якщо зрушень центрів не виявлено, виконують ще через 1 рік.

Крім зазначеної періодичності вимірювань, можуть проводитись контрольні вимірювання польових компараторів. Контрольні вимірювання виконують у наступних випадках:

- випадку виявлення зсувів центрів польового компаратора;
- у випадку появи різноманітних факторів, які могли вплинути на метрологічні характеристики польового компаратора, наприклад землетрус або поява карстових явищ поблизу пунктів;
- у випадку дослідження різноманітних факторів на метрологічні характеристики польового компаратора.

В нашому випадку виконувалось дослідження впливу врахування параметрів атмосфери на точність вимірювань довжин ліній польового компаратора.

Пункти щодо яких виявлено їх зміщення вище нормованого підлягають додатковому обстеженню. Нормованим значенням зміщення для

пунктів польового компаратора є 2 мм – для пунктів між якими відстань до 1000 м, і 5 мм – для пунктів між якими відстань понад 1000 м. Під час обстеження таких пунктів

При обстеженні пунктів що змістились перевіряють їх технічний стан: відповідність конструкції та глибини його закладання вимогам технічної документації, наявність пошкоджень, цілісність конструкції, міцність цементу та його марку і т.д. Одночасно, додатково оцінюють інженерно-геологічні та геоморфологічні особливості місць закладки центрів базису.

За результатами польового обстеження стану центрів польового компаратору складають акт обстеження, в якому вказують стан пункту та наводять результати його аналізу.

Одночасно відзначається наявність просідань ґрунту навколо центру і пошкоджень зовнішніх поверхонь (в разі пошкодження зовнішньої поверхні вказуються можливі причини цього).

У випадку незадовільного стану пункту виконують необхідні ремонтно-відновлювальні роботи: фарбування зовнішніх поверхонь пункту, покриття підземної частини пункту антикорозійними покриттями; відновлення зовнішнього оформлення, огорожі і т.п. Всі ремонтно-відновлювальні роботи виконуються відповідно до кошторису, що складається спеціально для зазначених цілей.

Забезпечення високої точності центрування приладів над пунктами польового компаратора виконують через обов'язкове застосування примусового центрування приладів над пунктами польового компаратора. Примусове центрування дозволяє встановлювати геодезичні прилади над пунктом польового компаратора із похибкою, що не перевищує 0,2 мм. В такому випадку пункт польового компаратора має вигляд металевого або бетонного стовпчика що встановлений на поверхні землі на висоту від 1,2 до 1,6 м. Інколи, для забезпечення умови видимості, висота пункту над поверхнею землі може досягати і 5 м. Проте в такому випадку у пункті

польового компаратора виникають можливі температурні деформації, величини яких залежать від матеріалу пункту і його висоти.

Забезпечення вимог видимості між пунктами польового компаратора виконується через спорудження пунктів польового компаратора такої висоти, яка б забезпечувала компенсацію нерівності рельєфу місцевості у місці влаштування польового компаратора, а також компенсацію або очищення можливого рослинного покриву. Лінії між пунктами польового компаратора повинні знаходитись не нижче ніж 0,5 м над поверхнею Землі та, за можливістю, знаходитись на одній висоті. Таким чином зменшується можливий вплив нерівномірності нагріву повітря на результати віддалемірних вимірювань

4.2 Аналіз джерел похибок при повірці геодезичної техніки

Як було описано вище, існує цілий рід похибок, які впливають на результати вимірювань під час повірки та калібрування геодезичної техніки на польовому компараторі. Тому під час вимірювань на польовому компараторі необхідно приділяти уваги можливим джерелам похибок та за можливістю уникати або компенсувати їх. При цьому врахуванню підлягають в першу чергу систематичні похибки, присутні під час вимірювань.

Розглянемо основні похибки, що впливають на результати вимірювань геодезичної техніки на польовому компараторі. До таких похибок можна віднести:

1. Похибка центрування приладу;
2. Похибка врахування параметрів зовнішнього середовища;
3. Похибка вимірювань вертикальних кутів;
4. Зміщення конструкції знаку під впливом сонячного випромінювання.

Серед зазначеного переліку похибок вимірювань певний систематичний вплив мають похибки врахування зовнішніх умов. Це загально відомі формули, існує кілька моделей врахування цих чинників. Майже кожний виробник геодезичних приладів має власні моделі врахування цих параметрів, про що нами було написано у розділі 2. Там же ми наводили модель врахування параметрів атмосфери фірми Leica Geosystems AG (1).

Як відомо, повітря безпосередньо впливає на характер проходження електромагнітних хвиль у ньому. Це проявляється у зменшенні швидкості поширення електромагнітних хвиль у порівнянні з вакуумом. Крім того, швидкість поширення електромагнітних хвиль залежить також і від довжини самої хвилі. Ступінь уповільнення швидкості поширення електромагнітних хвиль характеризується таким фізичним параметром, як показник заломлення.

У геодезії явище заломлення повітря проявляється у двох випадках:

1. явище рефракції, тобто зміни показника заломлення різних шарів атмосфери по шляху проходження електромагнітної хвилі.
2. зміна часу проходження електромагнітної хвилі внаслідок зміни щільності атмосфери.

Проте, навіть у випадку врахування параметрів навколишнього середовища, існує певна несистематична складова, вплив якої врахувати на результати вимірювань неможливо. Це пов'язано із різними чинниками, наприклад із неоівномірним нагрівом повітря вздов лінії польового компаратора.

Таким чином, у вимірах присутня нефрахована похибка внаслідок неточного врахування параметрів атмосфери яка впливає на результати випадковим чином.

Інші описані фактори повністю випадковим чином впливають на результати вимірювань відстаней.

Змоделювати вплив зазначених факторів на результати вимірювань відстаней польового компаратора складно, проте можливо дослідити їх сумісний вплив на результати вимірювань. При цьому деякі з цих факторів будуть краще себе проявляти на довгих відстанях, наприклад невраховані зміни параметрів навколишнього середовища, інші фактори краще визначати на коротких дистанціях, наприклад похибки центрування приладу та відбивача.

Для визначення впливу випадкових складових зазначених параметрів нами було вирішено провести ряд досліджень із визначення значень цього впливу.

4.3 Дослідження стабільності довжин ліній польового компаратора

Нами було виконано дослідження довжин ліній польового компаратора з метою визначення неврахованого впливу дії чинників, описаних у пункті 4.2. Дослідження виконувались електронним тахеометром Leica TS50. Для досліджень були вибрані наступні лінії польового компаратора:

- Vaza-C1;
- Vaza-C4;
- Vaza-C5;
- Vaza-C6.

Таким чином, ми намагались виконати вимірювання вздовж усього діапазону вимірювань польового компаратора рівномірно. Vaza-C1 – є найкоротшою лінією компаратора, Vaza-C5 та Vaza-C6 – найдовші його лінії.

Вимірювання виконувались у ясний сонячний день влітку. Перед кожним вимірюванням тахеометр і відбивач встановлювались на відповідний пункт польового компаратора, виконувалось їх горизонтування. У затінку біля базового пункту ретельно виконувалось вимірювання параметрів навколишнього середовища. Серія вимірювань складалась із одного повного

прийому, виконаного при КЛ та КП. У кожному напівприйомі виконувалось вимірювання відстані як осереднене значення з 30 вимірювань. Вимірювань виконувались кожні пів години.

Результати вимірювань ліній польового компаратора показано у табл. 4.1 – 4.4 та рис. 4.1-4.4

Табл. 4.1 Результати вимірювань при контролі стабільності вимірювань лінії польового компаратора BAZA-C1

№ пункту стояння	№ пункту наведення	Час вимірювань	Виміряна відстань, м	Температура, °C	Тиск, кПа	Поправка за зовні умови,	Приведена відстань, м	Відхилення, мм
BAZA	C1	8-25	55,0987	25,2	996	0,51	55,0992	0,0
		8-55	55,0986	25,6	996	0,53	55,0991	-0,1
		9-25	55,0986	26,2	996	0,56	55,0992	0,0
		9-55	55,0987	26,5	996	0,58	55,0993	0,1
		10-25	55,0987	26,8	996	0,59	55,0993	0,1
		10-55	55,0986	27,1	996	0,61	55,0992	0,0
		11-25	55,0986	27,5	996	0,62	55,0992	0,0
		11-55	55,0986	28,0	996	0,65	55,0992	0,0
		12-25	55,0984	28,5	996	0,67	55,0991	-0,1
		12-55	55,0983	28,7	996	0,68	55,099	-0,2
		13-25	55,0983	29,2	996	0,71	55,099	-0,2
		13-55	55,0985	29,5	996	0,72	55,0992	0,0
		14-25	55,0984	29,5	996	0,72	55,0991	-0,1
		14-55	55,0986	29,3	996	0,71	55,0993	0,1
		15-25	55,0983	29,0	996	0,70	55,099	-0,2
		15-55	55,0983	28,5	996	0,67	55,099	-0,2

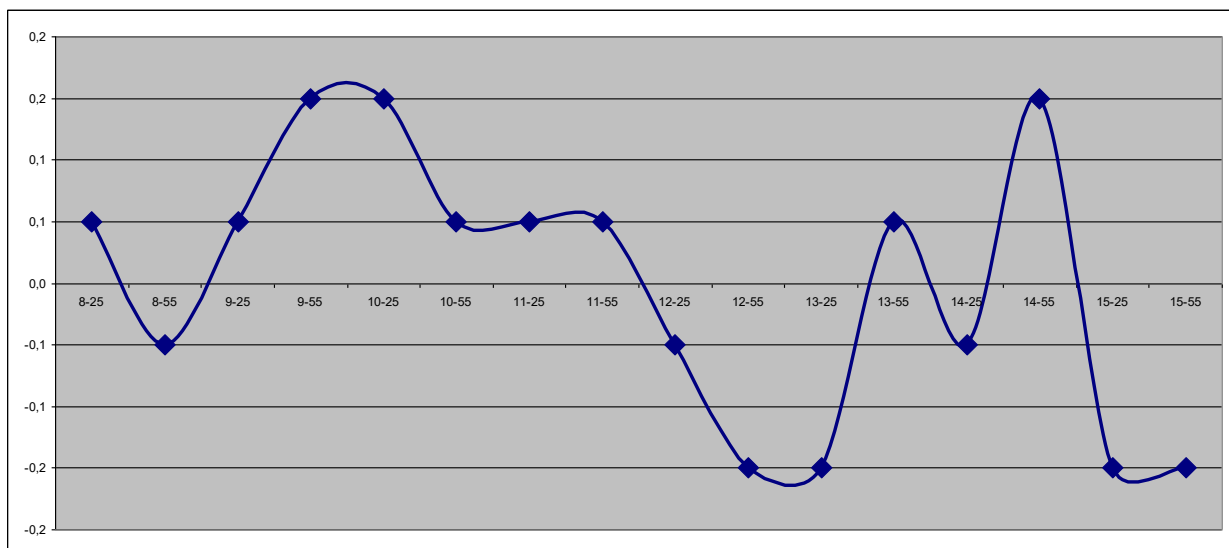


Рис. 4.1 Результати вимірювань зміни довжини лінії Vaza-C1 польового компаратора у часі.

Табл. 4.2 Результати вимірювань при контролі стабільності вимірювань лінії польового компаратора VAZA-C4

№ пункту стояння	№ пункту наведення	Час вимірювань	Виміряна відстань, м	Температур а, °С	Тиск, кПа	Поправка за зовні	Приведена відстань, м	Відхилення, мм
VAZA	C4	8-30	600,1360	25,2	996	5,58	600,1416	0,0
		9-00	600,1358	25,6	996	5,79	600,1416	0,0
		9-30	600,1354	26,2	996	6,11	600,1415	-0,1
		10-00	600,1354	26,5	996	6,27	600,1417	0,1
		10-30	600,1355	26,8	996	6,43	600,1419	0,3
		11-00	600,1350	27,1	996	6,59	600,1416	0,0
		11-30	600,1350	27,5	996	6,80	600,1418	0,2
		12-00	600,1347	28,0	996	7,06	600,1418	0,2
		12-30	600,1341	28,5	996	7,33	600,1414	-0,2
		13-00	600,1342	28,7	996	7,43	600,1416	0,0
		13-30	600,1338	29,2	996	7,69	600,1415	-0,1
		14-00	600,1337	29,5	996	7,85	600,1415	-0,1
		14-30	600,1337	29,5	996	7,85	600,1415	-0,1
		15-00	600,1339	29,3	996	7,74	600,1416	0,0
		15-30	600,1336	29,0	996	7,59	600,1412	-0,4
16-00	600,1338	28,5	996	7,33	600,1411	-0,5		

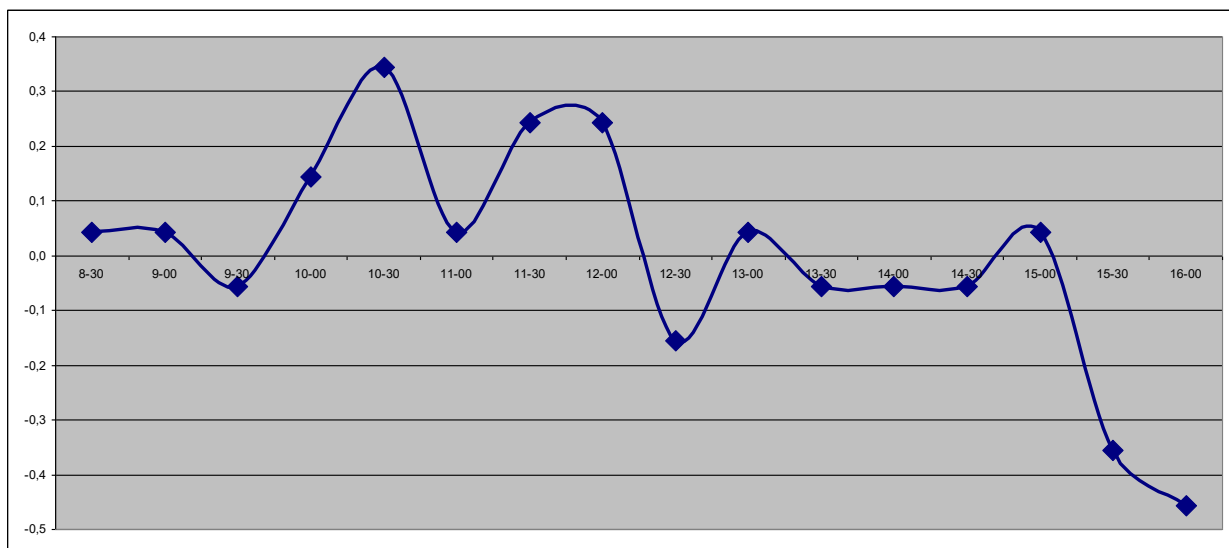


Рис. 4.2 Результати вимірювань зміни довжини лінії Vaza-C4 польового компаратора у часі.

Табл. 4.3 Результати вимірювань при контролі стабільності вимірювань лінії польового компаратора VAZA-C5

№ пункту стояння	№ пункту наведення	Час вимірювань	Виміряна відстань, м	Температура, °С	Тиск, кПа	Поправка за зовні	Приведена відстань, м	Відхилення, мм
VAZA	C5	8-40	1000,1384	25,3	996	9,39	1000,1478	-0,1
		9-10	1000,1381	25,8	996	9,83	1000,1479	0,0
		9-40	1000,1375	26,4	996	10,37	1000,1479	0,0
		10-10	1000,1375	26,6	996	10,54	1000,148	0,1
		10-40	1000,1370	26,9	996	10,81	1000,1478	-0,1
		11-10	1000,1366	27,2	996	11,07	1000,1477	-0,2
		11-40	1000,1366	27,5	996	11,34	1000,1479	0,0
		12-10	1000,1363	28,1	996	11,86	1000,1482	0,3
		12-40	1000,1355	28,4	996	12,12	1000,1476	-0,3
		13-10	1000,1354	28,8	996	12,47	1000,1479	0,0
		13-40	1000,1353	29,3	996	12,91	1000,1482	0,3
		14-10	1000,1351	29,5	996	13,08	1000,1482	0,3
		14-40	1000,1349	29,5	996	13,08	1000,148	0,1
		15-10	1000,1349	29,3	996	12,91	1000,1478	-0,1
		15-40	1000,1351	28,7	996	12,38	1000,1475	-0,4
		16-10	1000,1353	28,5	996	12,21	1000,1475	-0,4

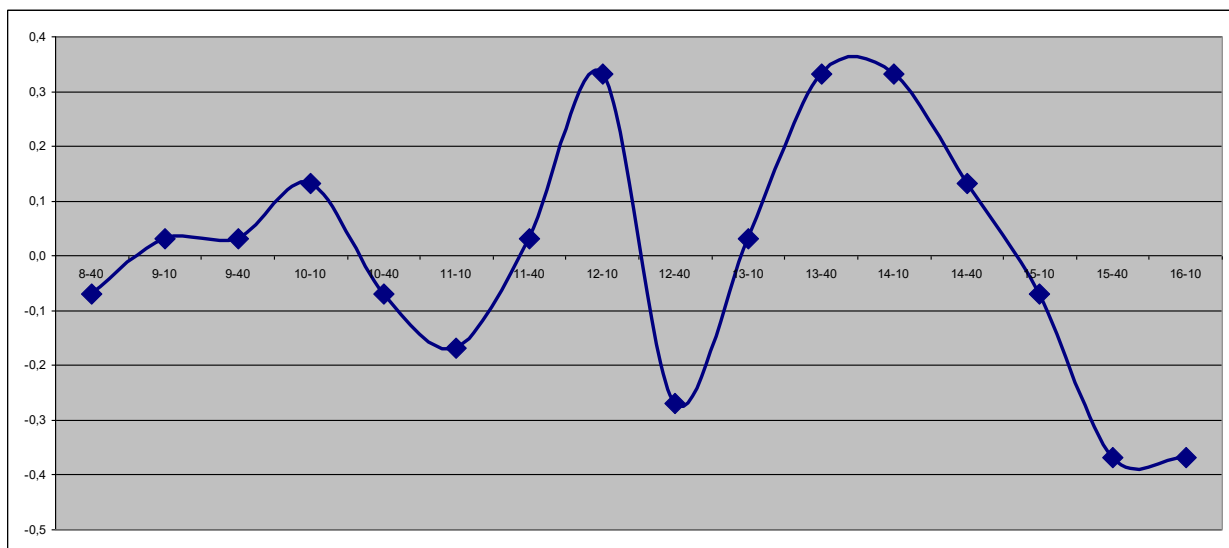


Рис. 4.3 Результати вимірювань зміни довжини лінії Vaza-C5 польового компаратора у часі.

Табл. 4.4 Результати вимірювань при контролі стабільності вимірювань лінії польового компаратора VAZA-C6

№ пункту стояння	№ пункту наведення	Час вимірювань	Виміряна відстань, м	Температура, °C	Тиск, кПа	Поправка за зовні	Приведена відстань, м	Відхилення, мм
VAZA	C6	8-50	1299,9564	25,6	996	12,55	1299,969	-0,1
		9-20	1299,9561	26,0	996	13,01	1299,9691	0,0
		9-50	1299,9555	26,5	996	13,59	1299,9691	0,0
		10-20	1299,9554	26,8	996	13,93	1299,9693	0,2
		10-50	1299,9549	27,1	996	14,28	1299,9692	0,1
		11-20	1299,9545	27,3	996	14,50	1299,969	-0,1
		11-50	1299,9540	27,7	996	14,96	1299,969	-0,1
		12-20	1299,9540	28,2	996	15,53	1299,9695	0,4
		12-50	1299,9529	28,5	996	15,87	1299,9688	-0,3
		13-20	1299,9528	29,1	996	16,55	1299,9693	0,2
		13-50	1299,9525	29,4	996	16,89	1299,9694	0,3
		14-20	1299,9523	29,5	996	17,00	1299,9693	0,2
		14-50	1299,9526	29,4	996	16,89	1299,9695	0,4
		15-20	1299,9522	29,3	996	16,77	1299,969	-0,1
		15-50	1299,9529	28,8	996	16,21	1299,9691	0,0
		16-20	1299,9531	28,4	996	15,76	1299,9689	-0,2

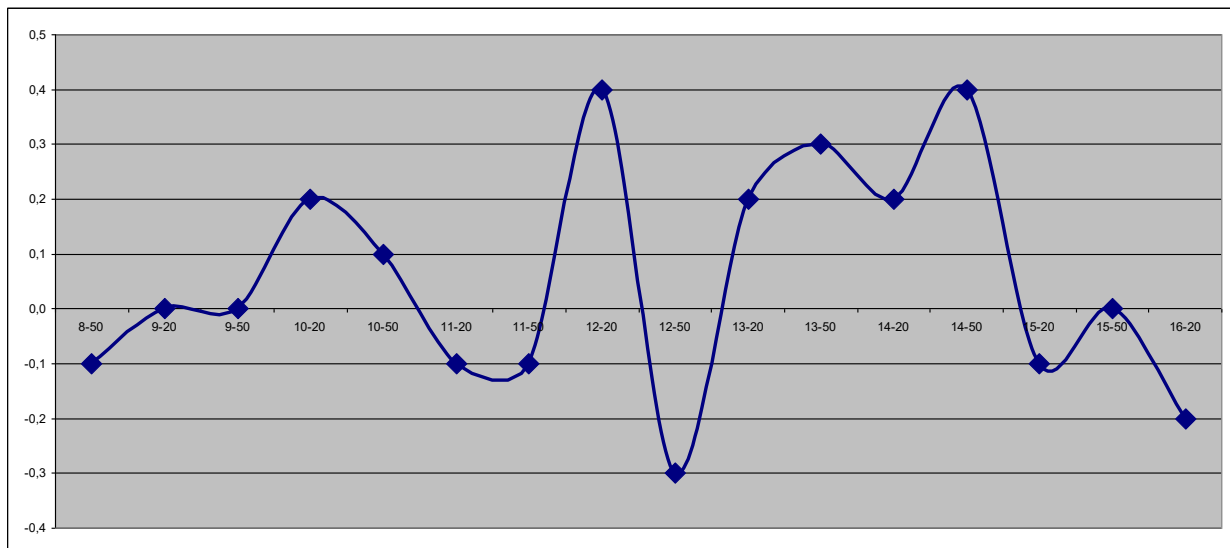


Рис. 4.4 Результати вимірювань зміни довжини лінії Vaza-C6 польового компаратора у часі.

Виконаємо аналіз отриманих результатів. Лінія польового компаратора Vaza-C1 є найкоротшою лінією полігону та складає 55,0992 м. Протягом часу всього спостережень виміряне значення довжини лінії змінюється у межах +0,1 ... - 0,2 мм. Основними джерелами похибок вимірювань, що мають переважний вплив на результати вимірювань довжини лінії Vaza-C1, є складова «а» похибки вимірювань відстаней електроним тахеометром та похибка центрування відбивача над пунктом польового компаратора. Друге джерело похибки виникає внаслідок програми вимірювань – у кожному прийомі вимірювань відбивача заново центрувався над відповідним пунктом польового компаратора. Оскільки СКП вимірювань відстаней, визначуване тахеометром за результатами вимірювання осереднього значення відстані з 30 разів її вимірювання у кожному прийомі не перевищував 0,04 мм, вважаємо що переважний вплив на результати вимірювань довжини лінії Vaza-C1 польового компаратора мала саме похибка центрування відбивача. Оскільки конструкція усіх пунктів польового компаратора однакова, можна зробити висновок, що примусове центрування на пунктах польового компаратора у м. Коломия виконується із точністю -0,2...+0,1 мм.

При вимірюванні довжин інших ліній польового компаратора значно більший вплив на результати вимірювань мали наступні джерела похибок вимірювань:

- похибка врахування параметрів навколишнього середовища;
- складова «в» похибки вимірювань відстаней електронним тахеометром.

Для аналізу впливу зазначених факторів на результати вимірювань, виконаємо накладання відхилень у результатах вимірювань різних ліній польового компаратора (рис. 4.5).

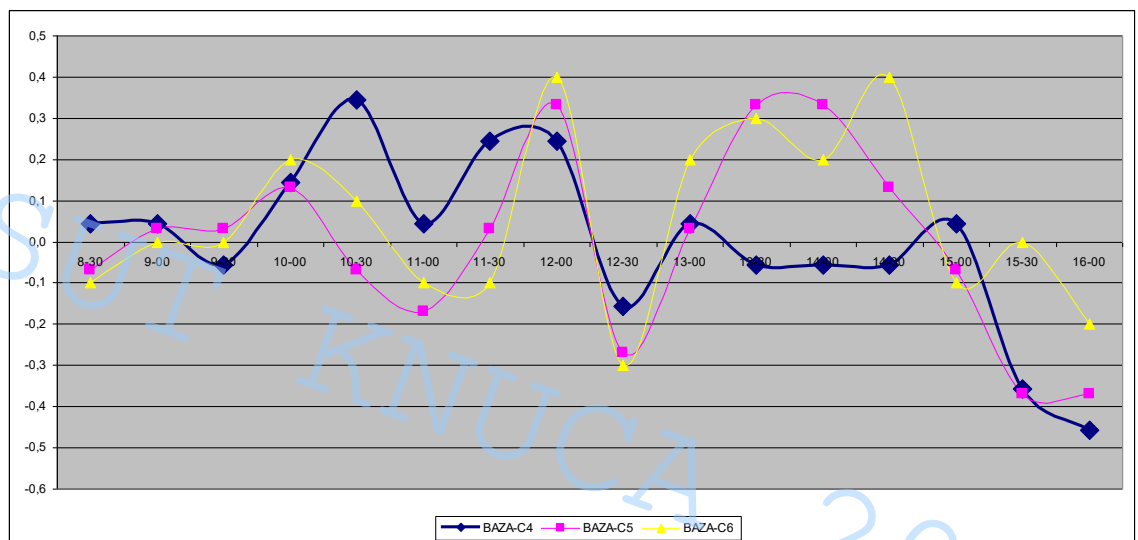


Рис. 4.5 Результати вимірювань ліній польового компаратора

Як видно із графіків, відхилення при вимірюванні усіх ліній варіювались у межах $-0,5$ мм... $+0,4$ мм, що свідчить про наявність додаткових джерел похибок у вимірюваннях, у порівнянні з виміряними довжини лінії BAZA-C1. При цьому, графіки відхилень мають деякі спільні риси, а саме спів падіння додатніх відхилень у вимірюваннях о 10-00, 12-00 та 13-00, та спів падіння від'ємних відхилень у вимірюваннях о 11-00, 12-30, 15-00 та 16-00. Неспівпадіння графіків між собою не перевищує 0,4 мм, що значно менше за виявлені значення відхилень у вимірних відстанях. Та може бути пояснено похибками центрування відбивача та складовою «а» похибки вимірювань відстаней електронним тахеометром. На нашу думку, ключовим фактором, що вплинув на результати вимірювань довжин ліній польового

компаратора стала похибка врахування параметрів навколишнього середовища, що могло бути визвано наступними факторами:

1. Похибка вимірювання значення температури навколишнього середовища термометром;
2. Нерівномірність нагріву температури повітря вздовж лінії польового компаратора.

Перший фактор міг бути присутній в середині дня та виникати внаслідок можливого короткочасного потрапляння сонячних променів на поверхню термометра або поверхню землі біля термометра, що могло призвести до його надмірного нагріву.

Другий фактор на нашу думку проявився у кінці спостережень, коли нерівномірне охолодження повітря в кінці робочого дня призвело до вимірювання неправильного значення температури повітря вздовж вимірюної лінії.

Таким чином, задача визначення параметрів навколишнього середовища має переважне значення під час вимірювань довжин ліній польового компаратора та перевірки або калібрування віддалемірів на ньому. Забезпечення необхідної точності врахування цих параметрів можливе при встановленні спеціальних місць вимірювань цих параметрів, обладнаних автоматичними температурними датчиками. Місця повинні забезпечувати розташування датчиків у затемнених, хорошо провітрюваних місцях. Під час вимірювання ліній польового компаратора, довжиною понад 600 м, вимірювання параметрів навколишнього середовища необхідно виконувати вздовж двох кінців вимірюваної відстані.

Висновки

В даній магістерській роботі було виконано аналіз вимог до створення та дослідження польових компараторів. Було виконано розроблення комплексу геодезичних робіт з визначення довжин ліній польового компаратора. Було виконано розроблення методики сумісного вирівнювання результатів вимірювань довжин ліній польового компаратора. За результатами вирівнювання було визначено значення довжин ліній польового компаратора.

Останнього часу виникають задачі модернізації польового компаратора для забезпечення можливості використання останнього для перевірки та калібрування ГНСС-приймачів. В магістерській роботі розроблена методика такої модернізації, з урахуванням забезпечення мінімальної кількості будівельних робіт. Запропонована методика дозволяє використовувати лінійний польовий компаратор для виконання перевірки та калібрування ГНСС приймачів при додатковому улаштуванні всього двох пунктів.

В магістерській роботі виконано розроблення комплексу геодезичних робіт при визначенні довжин баз ліній, перевищень та координат пунктів польового компаратора для перевірки ГНСС-приймачів.

Однією із найважливіших задач утримання польового компаратора є періодичних контроль стабільності його пунктів. В магістерській роботі виконано один цикл таких спостережень та визначено необхідність підвищення точності вимірювань температури повітря від час проведення лінійних вимірювань.

Список літератури

1. ISO 17123-4:2011 — «Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments)»
2. [ГОСТ 8.503-84 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения длин в диапазоне 24-75000 м.](#)
3. Самойленко О. М. Опрацювання результатів вимірювань довжини для звірень або калібрувань віддалемірів і тахеометрів на польовому компараторі / О. М. Самойленко, О. М. Адаменко // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. — № 90. — С. 15–28.
4. И.С. Тревого, И.М. Цюпак [Современный научный геодезический полигон для аттестации приборов и технологий](#) — Національний університет «Львівська політехніка», Львів, . – 2011. – № 74. – С. 133-136.
5. В. Купко, П. Неежмаков, А. Олейник, Е. Занимонский ННЦ «Институт метрологии», Харьков; И. Тревого, И. Цюпак Национальный университет «Львовская политехника», Львов; Я. Цисак Институт геодезии и картографии, Варшава. «Геодезия и метрология больших длин и коротких векторов, эксперименты и эталоны» // УДК 528.21// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, випуск II (32), 2016.
6. Метрологічна атестація еталонного базису технологією GNSS — http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2014/pages/07/8.pdf
7. Мурзайкин И.Я., Сивакова Н.И., Метрологическое обеспечение геодезических измерений // Геодезия и картография. – 2013. – № 1. – С. 8-10.

8. Общие технические требования к образцовым базисам для контроля геодезических дальномеров. РТМ 68-8.12-85 — <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293837/4293837286.htm>
9. Тревого І.С., Костецька Я.М. Проблеми метрологічного забезпечення віддалемірних вимірів в Україні//Вісник геодезії та картографії. 1997. № 1(7). – С. 61-66.
10. Тревого І.С., Савчук С.Г., Костецька Я.М. Проблеми створення та перспективи оптимального використання наукового геодезичного полігона//Вісник геодезії та картографії. 2001. № 3. – С. 35-40.
11. Тревого І.С., Савчук С.Г., Денисов О.М. та ін. Науковий геодезичний полігон для метрологічної атестації геодезичних приладів та технологій//Сб. науч. трудов «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва». 2005. – С. 33-43.
12. Тревого І.С. Геодезический полигон для метрологической аттестации приборов и апробации технологий//Геопрофи. 2009. № 1. – С. 6-12.
13. Тревого І.С., Савчук С.Г., Денисов О.М., Волчко П.І. Новий збірцевий геодезичний базис //Вісник геодезії та картографії. 2004. № 1. – С. 12-16.
14. Тревого І.С. Метрологічна атестація еталонних базисів технологією GNSS / І.С.Тревого, І.М. Цюпак// Метрологія та прилади.- 2014.- №6.- С. 52-55.
15. Учет атмосферных влияний на астрономо-геодезические измерения / А.Л. Островский, Б.М. Джуман, Ф.Д. Заболоцкий, Н.И. Кравцов. – М.: Недра, 1990. – 235 с. – с. 18-24, 182-227.
16. Leica MS50/TS50/TM50. Керівництво користувача. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.onepointsurvey.com/pdf/Leica-MS50-TS50-TM50-user-manual.pdf>