

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ВІВАТ АНАТОЛІЙ ЙОСИПОВИЧ

УДК: 528.48

**УДОСКОНАЛЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
ВИМІРЮВАНЬ В ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБОТАХ**

05.24.01 Геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів–2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук,
професор **Церклевич
Анатолій Леонтійович**,
завідувач кафедри
інженерної геодезії
Національного університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук
Самойленко Олександр Миколайович,
директор Науково-виробничого інституту геометричних,
механічних та віброакустичних вимірювань та оцінки
відповідності засобів вимірювальної техніки (Інститут № 4).

кандидат технічних наук
Романишин Ігор Богданович,
ад'юнкт кафедри геодезії і геоматики Політехніки
Сьвентокшинської, м. Кельце, Польща.

Захист відбудеться «15» червня 2023 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, ауд. 502, II навч. корпус.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «05» травня 2023 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



Андрій СОГОР

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з головних цілей і напрямів розвитку промислового та цивільного будівництва на сучасному етапі є підвищення технічного та якісного рівня будівельних робіт. Оперативне вирішення геодезичною службою будівельних задач сприяє покращенню якості, зниженню вартості, підвищує експлуатаційну надійність та довговічність будинків і споруд, запобігає дефектам та руйнуванням. Однак вирішення наукових та практичних задач у галузі геодезичного забезпечення будівництва ведеться епізодично, різними організаціями, що призводить до послаблення ефективності роботи геодезичних служб, відтоку кваліфікованих кадрів, зниженню надійності, безпеки та якості будівництва і, як наслідок, до підвищення аварійності та додаткових витрат. Це свідчить про відсутність державної концепції розвитку геодезичного забезпечення точності вимірювань геометричних параметрів будівництва, розроблення якої потребує об'єднання зусиль багатьох зацікавлених інституцій, відомств та підприємств у сфері будівельної галузі. Існують також проблеми інформаційного забезпечення будівельного комплексу з питань геодезії, маркшейдерії та якості будівництва. Недостатньо використовуються інформаційні технології в будівництві та при експлуатації будівель та споруд, відсутній банк даних про їх стан та експлуатаційні параметри. Ці питання є особливо актуальними, враховуючи перехід економіки України в цифровий формат з широким застосуванням BIM-технологій у будівництві та впровадженням геоінформаційних систем. Найбільш часто повторюваними дефектами є зміщення конструкцій відносно проектних осей, відхилення від вертикалі й проектних відміток, ексцентриситет конструкцій. Ці та інші порушення призводять до зниження несучої здатності та стійкості змонтованих конструкцій, створюють передумови для аварій, знижують експлуатаційну надійність і довговічність будинків та споруд, викликають великі непродуктивні затрати на усунення порушень як в процесі будівництва, так і в процесі експлуатації споруд.

Високоточна інженерна геодезія за точністю наближається до машинобудівних допусків, але має інший масштаб застосування на об'єктах з розмірами в десятки, сотні і більше метрів (як правило, така ситуація пов'язана з монтажем і контролем технологічного обладнання, об'єданого в загальний технологічний комплекс). Вимірювання ліній, кутів, створів, перевищень, приростів координат є напрямками розвитку прецизійної інженерної геодезії, коли наявні методи не в повній мірі відповідають вимогам поставленої задачі. При цьому вимоги до точності та умов виконання вимірювань нерідко бувають унікальні. Так розміри технологічного обладнання можуть становити від сотень до тисячі метрів, а точність установки у проектне положення – десятки і соті частки міліметра. Тому вдосконалення методів з підвищення точності вимірювань завжди буде залишатись актуальним завданням у практиці інженерно-геодезичних робіт. Також важливим завданням є виконання моніторингового спостереження за просторовим положенням обладнання протягом усього терміну експлуатації.

Особлива увага в сенсі безпечної експлуатації повинна приділятися гідроелектростанціям (ГЕС) та гідроакумуючим електростанціям (ГАЕС), що

розташовані в гірських місцевостях на великій висоті і в сейсмонебезпечних зонах. Все це вимагає моніторингу деформаційного стану подібних споруд для забезпечення руйнування. У зв'язку з цим виникла необхідність у застосуванні сучасних геодезичних приладів, які змінили технологію геодезичних вимірювань і дозволили працювати в просторових координатах в автоматичному режимі.

В останні роки ведеться інтенсивне будівництво висотних споруд. Постійне збільшення їх висоти і розмірів вимагає пошуку нових технічних рішень. Це ставить нові завдання з геодезичного забезпечення будівництва та оцінки достовірності, надійності і точності вимірювань. Увесь процес геодезичного забезпечення будівництва висотних споруд вимагає одночасно виконуваного і функціонально пов'язаного між собою комплексу вимірювань, який об'єднаний новим терміном - багатофункціональні вимірювання. Поєднання декількох методів для встановлення несучих конструкцій споруд в проєктне положення дає позитивний ефект і дозволяє здійснювати незалежний контроль вимірювань. Сучасні методи будівництва для дотримання технологічного процесу вимагають також розробки нових методик та інструментарію, особливо в умовах обмеженого простору планувальної забудови.

Підвищенню точності вимірювань в інженерній геодезії сприяли дослідження таких українських вчених, як Відуєв М.Г., Баран П. І., Бурак К. О., Самойленко О. М., Боровий В. Г. Бурачек, Костецька Я. М., Тревого І. С., Перій С.С. та інші. У створенні інфраструктури підвищення точності визначення координат ГНСС-методом вклали багато зусиль українські вчені Савчук С. Г., Третяк К. Р., Кучер О.В., Заєць І. М., Марченко О.М., Калинич І. В. і зарубіжні вчені С. Rizos, Z. Altamimi, В. Hofmann-Wellenhof та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідна робота автора відповідає науковому напрямку кафедри інженерної геодезії «Модернізація технологій інженерно-геодезичних робіт і геодезичного моніторингу інженерних споруд та геодинамічних явищ» та науковій тематиці робіт галузевої науково-дослідної лабораторії «Геодезичного моніторингу та рефрактометрії» (ГНДЛ-18) і навчально-наукової лабораторії «Опрацювання супутникових вимірювань» Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Результати досліджень автора пов'язані з госпдоговірною та науково-дослідною роботою за державним замовленням:

1. ДЗ/102-2021 «Розбудова мережі активних перманентних станцій глобальної навігаційної супутникової системи в південно-західному транскордонному секторі України для розширення послуг точного позиціонування»;

2. ГД № 0672 «Про створення єдиного просторово-часового координатного поля Дністровської ГАЕС».

3. 03/24-06 РЕМ «Геодезичний контроль (вивірка) технологічного обладнання статора турбогенератора ТВВ-1000-4УЗ на ВП ЗАЕС».

Мета і завдання дослідження - удосконалення геодезичних методів вимірювань в інженерно-геодезичних роботах. Для досягнення цієї мети в роботі необхідно було виконати такі завдання:

1. Удосконалити методику визначення координат глобальними навігаційними супутниковими системами (ГНСС) та оптимізувати побудову геодезичних мереж цими методами.

2. Розробити методику трансформації просторових координат, визначених ГНСС-методом, у планову та висотну геодезичну мережу інженерного об'єкта.

3. Удосконалити методи вимірювань електронними тахеометрами з використанням додаткового обладнання для визначення геометричних параметрів інженерних споруд в умовах обмеженого простору.

Об'єктом дослідження є високоточні інженерно-геодезичні вимірювання на об'єктах будівництва і моніторингу інженерних споруд.

Предметом дослідження є удосконалення геодезичних методів та опрацювання результатів вимірювань в інженерно-геодезичних роботах.

Методи дослідження. Для виконання дисертаційної роботи застосовували методи лінійної алгебри, математичного аналізу та статистичні методи математичного опрацювання геодезичних спостережень, а також методи математичного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що в роботі на основі результатів вимірювань:

1. Розроблено методику оптимізації побудови геодезичних мереж з використанням статичних та синхронних RTK-векторів, визначених ГНСС-методом, яка узгоджена із заданою точністю та економічною ефективністю.

2. Запропоновано методику трансформації просторових координат кінематичних геодезичних мереж, яка дозволяє в часовому вимірі підтримувати трансформаційне поле для системи координат інженерного об'єкта.

3. Теоретично обґрунтовано та розроблено методику підвищення точності вимірювання віддалей лінійно-кутовим способом електронним тахеометром з врахуванням його метрологічних характеристик, яка забезпечує точність 0,2 мм на віддалі 50 м.

4. Удосконалено методику визначення параметрів інженерних споруд та технологічного обладнання електронним тахеометром в умовах обмеженого простору із застосуванням розробленого обладнання.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропоновану методику визначення просторових координат за вимірними статичними та синхронними RTK ГНСС-векторами використано для моніторингових спостережень геодинамічної мережі Дністровської ГАЕС.

2. Розроблені візирні цілі та 3D- тримачі використовують геодезисти з метою визначення параметрів інженерних споруд.

3. Розроблену методику вимірювання в умовах обмеженого простору використано для відновлення параметрів статора генератора на Запорізькій АЕС.

4. Методи та результати досліджень також впроваджені в навчальний процес для студентів спеціальності – 193 Геодезія та землеустрій, для дисципліни «Інженерно-геодезичний моніторинг і контроль в будівництві» та «Сучасні інженерно-геодезичні технології».

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковані в співавторстві у працях [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] та одноосібно – [4] досліджено точність визначення перевищень методом ГНСС, де автор планував та виконував спостереження та їх опрацювання. В опублікованих працях [6, 9, 2] автору належать експериментальні дослідження для визначення координат різних ГНСС-технології; у працях [7, 8] – досліджено спеціальні пристрої для підвищення точності вимірювання віддалей лінійно-кутовим способом на взірцевому базисі II розряду; у праці [1, 10] – досліджено оптимальне положення електронного тахеометра для визначення його координат методом оберненої лінійно-кутової засічки. У роботах [13, 14] – розроблено оптимальну візирну ціль для підвищення точності візування, а також досліджено можливість підвищення точності визначення параметрів інженерних споруд електронними тахеометрами. У роботі [5] досліджено вплив зміни температури на геодезичне обладнання. У роботі [12] апробовано методика визначення параметрів інженерних споруд в умовах обмеженого планування У роботі [3] поєднано класичні та супутникові технології для встановлення обладнання у проектне положення. У роботі [11] досліджено можливість використання ГНСС-технологій та електронного тахеометра для визначення параметрів архітектурних форм.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях:

1. Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум» (Львів) у 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 роках.
2. Міжнародна науково-практична конференція «Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні» (Ужгород) у 2012, 2014, 2016, 2018, 2020 роках.
3. Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Geoterrace» (Львів) у 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022 роках.
4. Міжнародна науково-практична конференція «Екогеофорум» (Івано-Франківськ) у 2016 році.
5. Міжнародна науково-практична конференція «Геопростір» (Київ) у 2017 році.
6. Міжнародна науково-практична конференція «Innowacyjne technologie geodezyjne- zastosowanie w ruznych dziedzinach gospodarki» (Kamionka, Poland) у 2017, 2018 роках.
7. III Міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми відновлюваної енергетики, будівництва та екологічної інженерії» (Кельце, Польща) у 2019 році.
8. Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Харків, Україна) у 2019 році.
9. Перша всеукраїнська науково-практична конференція «ВІМ-технології в будівництві: досвід та інновації» (Харків, Україна) у 2021 році.

10. 29th International Scientific Conference SCEgeo 2022 “Surveying, Civil Engineering and Geoinformation for Sustainable Development” (Wrocław, Poland) у 2022 році.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 14 наукових праць. Дванадцять статей у наукових фахових виданнях України та дві статті у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Web of Science та Scopus.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (91 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 136 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, викладено відомості про апробацію роботи, повноту результатів публікацій та їх впровадження.

У першому розділі дисертації «**Сучасний стан ведення інженерно-геодезичних робіт в Україні**» розглянуто питання використання геодезичних методів у забезпеченні будівництва. До інженерних споруд, що вимагають геодезичного забезпечення, відносяться: транспортні споруди (залізниці, шосейні дороги, злітно-посадкові смуги, мости, естакади тощо), трубопроводи, дамби, комплексні промислові споруди, атомні, тепло та гідроелектростанції, висотні будівлі. Геодезичне забезпечення таких споруд в Україні виконують різними методами: мікротріангуляції, трилатерації, гідронівелювання, створних вимірювань, інтерференційних лазерних систем. Їх можна поділити на три сегменти: геодезичне забезпечення координатною основою пунктів ДГМ, геодезичне забезпечення інженерних споруд при їх зведенні та експлуатації, геодезичне забезпечення монтажу технологічного обладнання. Перший сегмент нормується інструкціями топографо-геодезичного виробництва, другий – ДБН та ГБН, а третій ДБН та розробкою стандартів СОУ. Інженерні об’єкти, які підлягають геодезичному моніторингу є малими (з периметром у сотні метрів) та великими (з периметром у десятки кілометрів). Всі інженерні об’єкти повинні бути визначені у ДГМ та закріплятись геодезичними пунктами, марками та реперами певного зразка. Введення УСК-2000 виправило помилки СК-42 та підвищило точність взаємного положення пунктів планової ДГМ України. Так середня СКП із 24657 пунктів 1-4 класів тріангуляційної ДГМ дорівнює 0,028 м. Підвищення точності ДГМ вирішило проблему малих інженерних об’єктів, а оскільки геодезичні мережі великих об’єктів розвивались від старої СК-42, то похибки залишились. Використання приймачів ГНСС дало змогу оцінити точність геодезичних мереж таких об’єктів. У табл. 1 подано статистику точності планової геодезичної мережі Дністровської ГАЕС з 48 пунктів. Удосконаленням ДГМ є розвиток активних ГНСС-мереж. На 2022 рік на території України встановлено 407 ГНСС-станцій, які об’єднані у шість мереж різної форми власності та підпорядкування. За рекомендаціями міжнародної геодезичної служби такої кількості станцій достатньо для території з площею 603000 км².

Проблемою є неоднозначність координат, визначених від різних активних ГНСС-мереж.

Таблиця 1

Залишкові деформації планової геодезичної мережі Дністровської ГАЕС

Залишкова деформація	x, м	y, м
Розмах	0,17	0,25
Середнє	0,10	0,15

У багатьох країнах активно використовують такі мережі та розробляють нормативні документи використання ГНСС для вирішення інженерних задач. Для великих та малих інженерних об'єктів виконують глобальну прив'язку до пунктів ДГМ. Для великих інженерних об'єктів за допомогою ГНСС здійснюють геодинамічний моніторинг у статичному режимі. За допомогою ГНСС-технологій у статичному режимі визначають координати пунктів опорної геодезичної мережі як для малих так і для великих об'єктів.

Вимагають додаткових досліджень сучасні ГНСС-режими вимірювань такі як кінематика у реальному часі (RTK), кінематика з постопрацюванням (PPK), точного визначення положення (PPP). Метод RTK визначено як найбільш перспективний для використання у вирішенні інженерних задач будівництва. Також відзначимо, що для геодезичного забезпечення інженерних споруд під час їх зведення та експлуатації до складу геодезичних робіт входять: побудова зовнішньої геодезичної розмічувальної мережі, побудова геодезичної розмічувальної мережі будівництва, детальне розмічування елементів будівництва, створення внутрішньої розмічувальної мережі на вихідному та монтажних горизонтах, виконавче знімання, вимірювання деформацій фундаментів та конструкцій будівель. Вимірювання виконують різними геодезичними приладами та методами: осьові (одномірні), коли точки визначають відносно заданої лінії або осі; планові (двовимірні), коли точки спостерігають за двома координатами у горизонтальній площині; висотні – для визначення тільки вертикальних переміщень; просторові (тривимірні), коли знаходять повний зсув точок у просторі за трьома координатами. Згідно «інструкції з топографічного знімання..» геодезичні пункти закріплюють у вигляді будівельної сітки безпосередньо на будівництві, що не завжди є доцільним, особливо в умовах обмеженого просторового планування. Рекомендоване обладнання для вимірювань – теодоліти, нівеліри та сталеві рулетки. Щодо геодезичного забезпечення монтажу технологічного обладнання інженерних споруд, то в Україні, де неналагоджене виробництво геодезичного обладнання, переважно використовується класичний підхід для контролю геометричних параметрів інженерних конструкцій. Виконують контроль прямолінійності, співвісності, горизонтальності, нахилу, вертикальності, паралельності, перпендикулярності, площинності, кривини та використовують оптичні і цифрові теодоліти, електронні тахеометри, лазерні створовказівники, інтерферометри.

Нами також розглянуті сучасні геодезичні прилади та технології для виконання інженерно-геодезичних робіт у країнах світу. На рис. 1 подано сучасні геодезичні технології, точність та діапазон вимірювання. Відзначимо, що використання ГНСС-приймачів в RTK-режимі, є перспективним для вирішення першого сегменту

забезпечення будівництва, а електронних тахеометрів з додатковим обладнанням – для другого та третього сегментів.

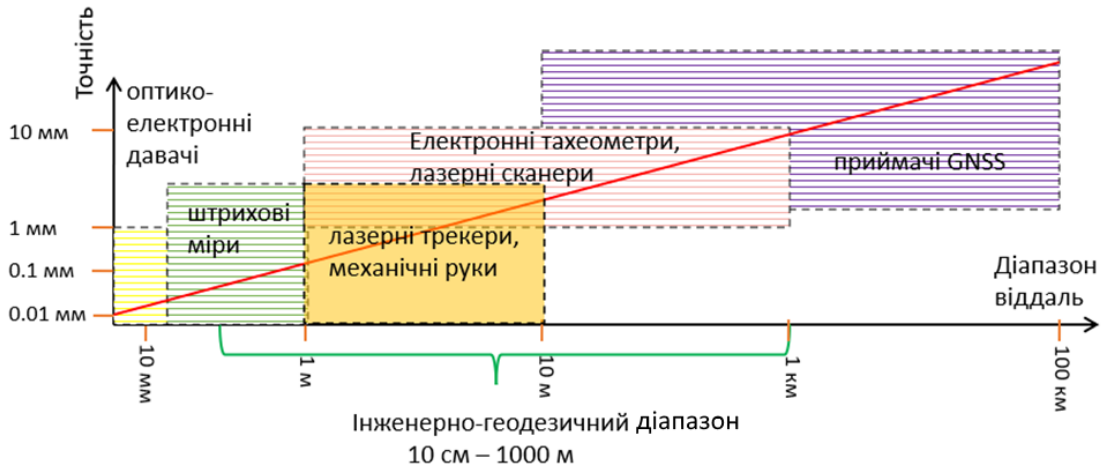


Рис.1. Сучасні геодезичні технології вимірювання

У другому розділі дисертації «Дослідження точності ГНСС-методу в RTK-режимі та використання його в інженерно-геодезичних роботах» розроблені та апробовані методики побудови геодезичних мереж з використанням ГНСС. Досліджено точність RTK-режиму на різних локаціях у різний час доби. Для підвищення точності визначення векторів в RTK-режимі запропоновано визначати синхронні вектори (коли два роверні приймачі (РП) працюють одночасно). Запропоновано та реалізовано на Дністровській ГАЕС методику підвищення точності геодезичних мереж великих інженерних об'єктів шляхом побудови мереж базових станцій (БС) із сітками поправок у планове та висотне положення. Для створення методики побудови прецензійних геодезичних мереж ми виконали:

1. Дослідження точності RTK-режиму залежно від віддалі до БС у спеціально створених мережах БС.
2. Дослідження точності RTK-режиму від автономної БС з використанням внутрішнього програмного забезпечення приймача.
3. Дослідження виду зв'язку передачі поправок на точність RTK-режиму.
4. Дослідження методики визначення синхронних векторів в RTK-режимі для побудови високоточних геодезичних мереж.

Перша локація для досліджень – це геодинамічний полігон Дністровської ГАЕС, складається із 49 пунктів примусового центрування, які розміщені у різних умовах видимості супутників з пересіченим рельєфом та рослинністю (рис. 2а). На цих пунктах щорічно виконують довготривалі спостереження ГНСС-методом у статичному режимі. У циклі спостережень кожен вектор визначають 2-3 рази, при цьому використовують 8-10 мультичастотних ГНСС-приймачів. Отже, визначають близько 700 векторів, їх опрацьовують та врівноважують. Велика кількість надлишкових вимірів гарантує точність визначення центрів знаків в 1-2 мм. Друга локація для досліджень – це пункти примусового центрування, що знаходяться на другому корпусі Львівської політехніка (рис. 2б). Попередньо ми визначили координати чотирьох пунктів TR01, TR05, TR06, TR10 чотиригодинною сесією ГНСС-методом у статичному режимі із СКП 1-2 мм. У зв'язку з цим визначені

координати пунктів примусового центрування можна прийняти за еталонні для дослідження точності RTK-режиму. Для цього ми скомплектували шість мобільних БС на базі приймачів Trimble R9s.

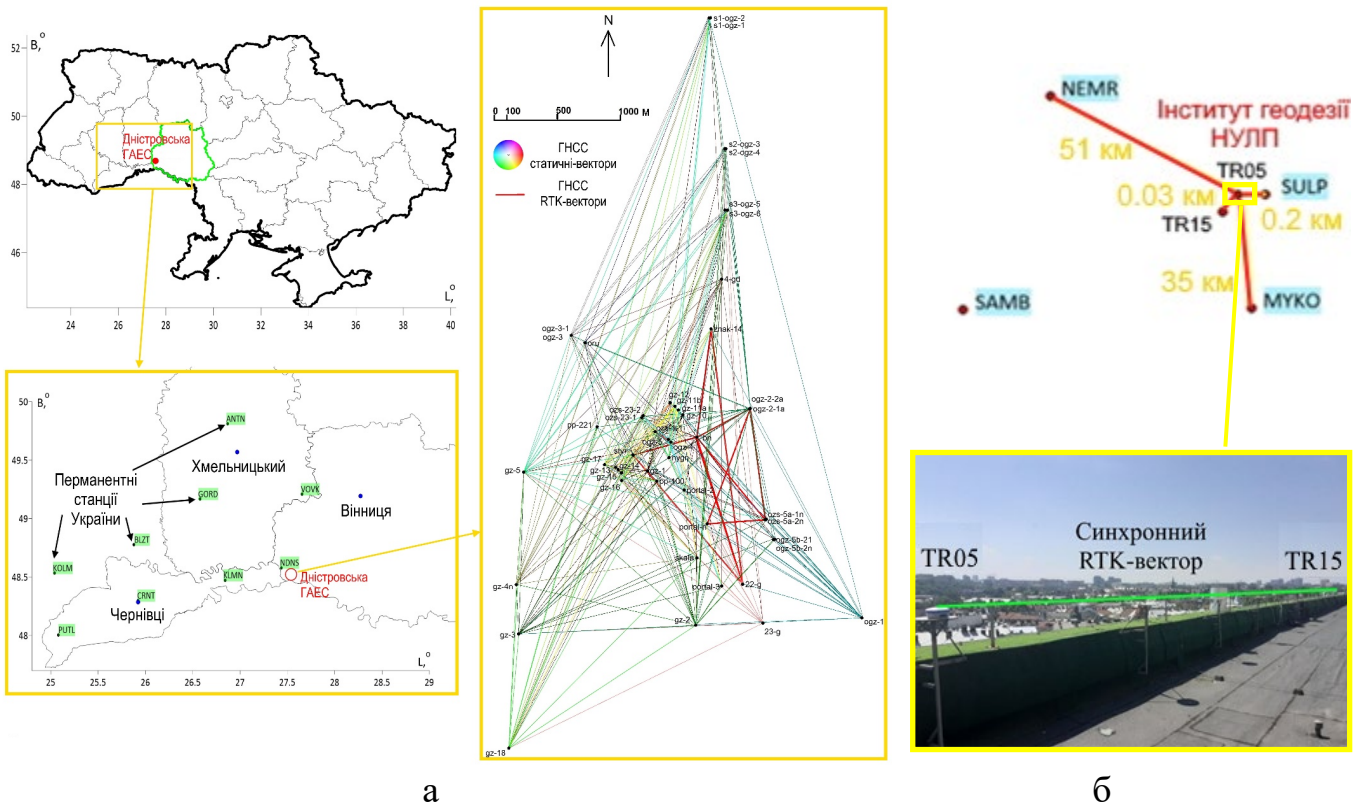


Рис.2. Схема локації 1 – пункти Дністровської ГАЕС (а), та локації 2 – пункти лабораторії Геотераса НУЛП (б)

Кожну сесію такі мобільні БС встановлювали на пункти примусового центрування. Відносно цих БС, за допомогою РП визначали координати на різних віддалях. Координати РП визначали чотири рази за програмою поданою у табл. 2. Ця програма спостережень ґрунтується на типових опціях програмного забезпечення щодо кількості вимірювань контрольної ініціалізації, використання супутникових сузір'їв. Також до програми введено отриманий розв'язок за технологією віртуальної станції (VRS) та від одиничної базової станції.

Таблиця 2

Програма визначення координат в RTK-режимі

№ визначень	Частота запису, Гц	Тривалість спостережень, с	Кількість ініціалізацій	Розв'язок RTK	Сузір'я супутників
1	1	300	1	VRS	GPS, GLO
2	1	30	2	VRS	GPS, GLO
3	1	30	2	Одинична	GPS, GLO
4	1	30	2	Одинична	GPS, GLO, GAL, BDU

Дослідження точності RTK-режиму залежно від віддалі до БС у спеціально створених мережах БС. Це дослідження виконано на двох локаціях в діапазоні довжин базових векторів від 0,2 до 51 км. Просторові координати (XYZ)

геодезичних пунктів, визначались програмним забезпеченням РП. У координати, визначені РП, введено всі інструментальні та атмосферні поправки, за допомогою спеціального програмного забезпечення управління БС. Програмне забезпечення РП також виводить у файл статус ГНСС-рішення та його СКП. Для цього і всіх наступних досліджень використовували тільки фіксовані рішення. Оскільки такі визначення координат виконують геодезисти для вирішення інженерних задач у необхідній проекції на площині, то є необхідність відобразити досліджувану точність у плані та у висоті. Щоб не спотворювати просторові координати проекцією та похибками квазігеоїда, перетворення виконувались в такій послідовності. За формулами (1) за просторовими координатами обчислювали геодезичні еліпсоїдальні координати. Далі визначались різниці $\delta_{B''} = (B_{RTK} - B_{Стам}) \cdot 3600$, $\delta_{L''} = (L_{RTK} - L_{Стам}) \cdot 3600$, $\delta_H = (H_{RTK} - H_{Стам})$.

$$B = \arctg \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N}{N + H} \right),$$

$$L = \arctg \frac{Y}{X}, \quad (1)$$

$$H = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos B} - N.$$

Градусну міру різниць перетворювали у метричну, виходячи із довжини дуги паралелі на екваторі, за формулами:

$$\delta_{B^m} = \delta_B \cdot 31_m, \quad (2)$$

$$\delta_{L^m} = \delta_B \cdot 31_m \cdot \cos B.$$

Точність планового положенні розраховувалась за формулою:

$$\delta_{Пл.} = \sqrt{\delta_{B^m}^2 + \delta_{L^m}^2}. \quad (3)$$

Результат досліджень подано на рис. 4а. Штриховою лінією показані абсолютні похибки планового та висотного положення вибірки із 12 пунктів, визначених на різних довжинах базових векторів у різний час. На рис. 4б подано абсолютні похибки планового та висотного положення одного і того самого пункту, визначених сім разів на різних довжинах базових векторів та у різний час. Суцільною лінією на цих рисунках подано апроксимацію вимірів лінійною функцією та функцією експоненти.

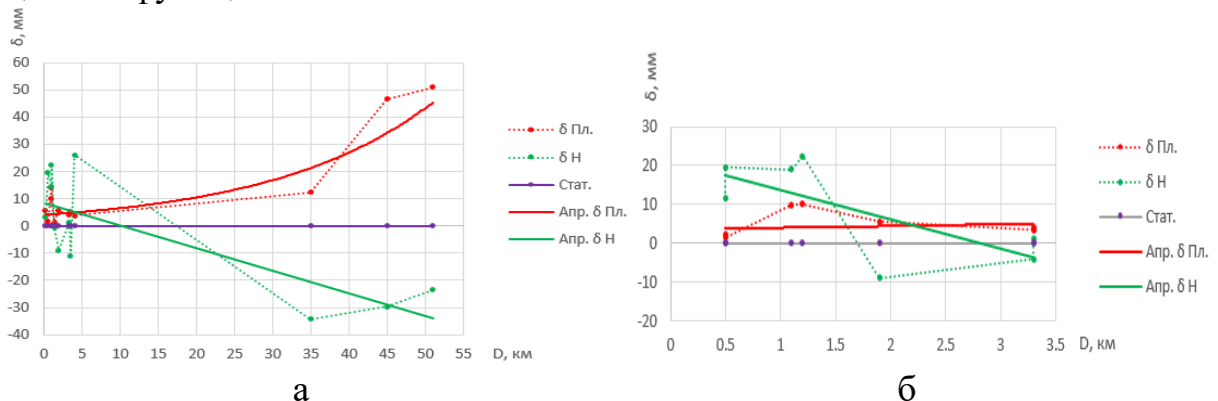


Рис.4. Абсолютна похибка планового та висотного положення визначеного в RTK-режимі

Реалізації RTK-режиму від автономної БС. Територія України забезпечена перманентними БС для ведення більшості геодезичних робіт, але зазначимо, що з рис 4а спостерігається лінійне зменшення точності від збільшення віддалі до БС в RTK-режимі. Також враховуючи те, що деякі інженерні об'єкти є об'єктами критичної інфраструктури, а робота в RTK-режимі залежить від наявності інтернету та живлення на БС, то виникла необхідність дослідити можливість створення автономної БС для передачі поправок в РП. В якості автономної БС використано приймач виробництва Stonex S900a. Забезпечення зв'язку між БС та РП здійснено за допомогою SIM картки телекомунікаційного оператора України «Київстар» із статичною IP адресою. Під час досліджень оператор прикріплював приймач S900a до знаку примусового центрування на пункті TR05, вмикав та вводив точні координати. Таким чином, станція транслювала диференційні поправки у форматі RTCM 3.2 через протокол NTRIP. За час досліджень одночасно до автономної БС підключались до 5 РП. Результати досліджень подано на рис. 5. Також нами були визначені рівняння регресії (формула 4) для комплекту Stonex S700a+S900a від автономної БС:

$$M_{(Пл.визн.)RTK} = 3 \text{ мм} + 1 \text{ ppm} \quad (4)$$

$$M_{(Вис.визн.)RTK} = 4 \text{ мм} + 3 \text{ ppm}$$

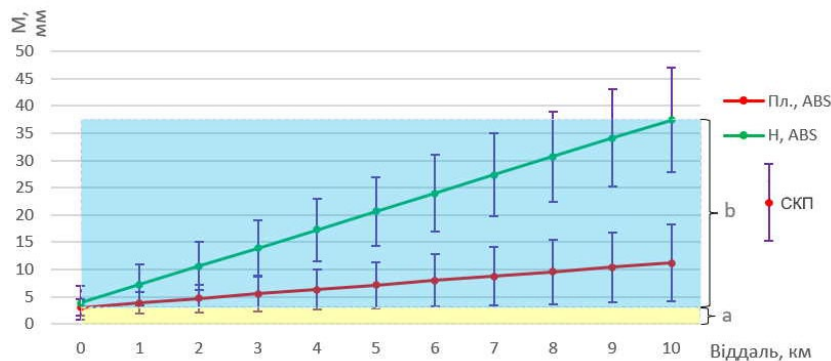


Рис.5. Графік рівнянь регресії комплекту Stonex S700a+S900a

Дослідження впливу зв'язку передачі поправок на точність RTK-режиму. Поправки з БС передають, використовуючи різні канали зв'язку, переважно через інтернет та радіозв'язок. Практично всі сучасні ГНСС-приймачі мають інтерфейс інтернет з трьох каналів та один радіо канал. Нами досліджено такі канали: інтернет через внутрішній GSM модем приймача, інтернет через GSM модем контролера, інтернет через WIFI. Для дослідження ми встановлювали прилад на пункт примусового центрування, вибравши тип зв'язку, виконували визначення координат на двох пунктах. Координати визначали із трьох прийомів для кожного типу зв'язку. Отримані координати кожного пункту дали можливість обчислити їх СКП. Залежності абсолютних похибок визначення положення від виду зв'язку не було виявлено.

Дослідження RTK-режиму з використанням двох синхронних РП. Для підвищення точності визначення координат ГНСС-методом в RTK-режимі ми

дослідили можливість застосування двох одночасно працюючих РП. Для цього використовували кінцеві координати класичного RTK-режиму як проміжні значення для обчислення векторів. Таким чином, із спостережень можна вилучити систематичні та випадкові похибки, які характерні для вимірів на різні епохи одним РП. Тому нами пропонується ввести у термінологію ГНСС новий термін «синхронний RTK-вектор», тобто вектор, який визначається одночасно двома РП. Для дослідження точності синхронних RTK-векторів нами було запроєктовані чотири мережі різної форми з використанням мобільних БС, та виконали визначення синхронних векторів двома РП. Конфігурація мобільних БС протягом однієї сесії була незмінна. Різні сесії відрізнялась за геометрією, умовами видимості супутників та віддаллю до РП. З перспективою контролю вимірювань у кожній сесії визначали RTK-вектори, які утворювали мережі у формі трикутника. Для кожного вимірювання в RTK-режимі отримано файл у форматі RW5 з просторовими координатами та СКП. Вимірювання виконували у чотири сесії за чотирма програмами (див. табл. 2). Загалом у синхронному RTK-режимі було визначено 56 векторів на десяти пунктах примусового центрування, які утворювали замкнуті фігури. За координатами початку та кінця вектора визначали прирости: DX_R , DY_R , DZ_R , та віддалі за формулою (5)

$$S_R = \sqrt{(X_{Rj} - X_{Ri})^2 + (Y_{Rj} - Y_{Ri})^2 + (Z_{Rj} - Z_{Ri})^2}, \quad (5)$$

де i, j – початковий та кінцевий пункт вектора.

Діапазон довжин векторів від 30м до 2000м. Ми обчислили відхилення δ_X , δ_Y , δ_Z , δ_S , від значень статичних векторів за формулою (6):

$$\delta_X = D_{X_R} - D_{X_S}, \delta_Y = D_{Y_R} - D_{Y_S}, \delta_Z = D_{Z_R} - D_{Z_S}, \delta_S = D_{S_R} - D_{S_S}, \quad (6)$$

де D_{X_S} , D_{Y_S} , D_{Z_S} , S_S – статичний вектор, D_{X_R} , D_{Y_R} , D_{Z_R} , S_R – синхронний RTK-вектор.

Оскільки ми оперуємо еталонними (визначеними у статичному режимі) значеннями, то абсолютну похибку можна обчислити за формулою

$$\Delta_i = |\delta_i|, \quad (7)$$

де i – визначуваний вектор. Приймаючи до уваги, що RTK-вимірювання у кожній програмі виконували за однаковою методикою, то для кожної групи векторів можна обчислити середню абсолютну похибку за формулою:

$$\Delta_{c_i} = \frac{\sum \Delta_i}{n}, \quad (8)$$

де n – кількість вимірювань. У табл. 3 подано максимальну, мінімальну та середню абсолютні похибки із вибірки з 14 векторів, визначених за програмою №1. У табл. 4 розраховано абсолютні середні похибки синхронних RTK-векторів, що визначенні за чотирма програмами спостережень. Опис програм спостережень подано у табл. 2.

Таблиця 3

Абсолютні похибки синхронних RTK-векторів визначених за програмою №1

Вектор	D_X , мм	D_Y , мм	D_Z , мм	D_S , мм
Δ_{MAX}	25,7	20,3	15,1	15,5
Δ_{MIN}	0,1	0,1	0,8	0,1
Δ_C	7,0	7,1	5,8	5,3

Таблиця 4

Абсолютні середні похибки RTK-векторів визначених за різними програмами спостережень

Вектор	Програма №1, Δ_C , мм	Програма №2, Δ_C , мм	Програма №3, Δ_C , мм	Програма №4, Δ_C , мм
D_X	7,0	8,6	4,2	6,2
D_Y	7,1	10,0	2,9	4,1
D_Z	5,8	10,5	6,7	6,5
D_S	5,3	9,8	4,2	3,8

За даними табл. 4, найточніше вектор D_S визначається за програмою №4 від одиничної базової станції за використанням чотирьох супутникових сузір'їв. Але деякі компоненти вектора визначаються точніше за програмою №3. Обчислимо вектори визначені одним РП та порівняємо їх із визначеними синхронно двома РП в RTK-режимі. У табл. 5 подано середні абсолютні похибки одних і тих же векторів визначених одним приймачем (Δ_{c_1}) у різний час та двома приймачами одночасно (Δ_{c_2}). Кожен елемент вектора, окрім D_Z , визначався точніше синхронно двома приймачами.

Таблиця 5

Порівняння похибок векторів визначених за програмою № 1 синхронно двома - Δ_{c_2} та одним - Δ_{c_1} приймачами

Вектор	D_X , мм	D_Y , мм	D_Z , мм	D_S , мм
Δ_{c_1}	17,7	10,5	8,0	9,7
Δ_{c_2}	12,0	5,2	9,3	3,6
$\Delta_{c_1} - \Delta_{c_2}$	5,7	5,3	-1,3	6,1
$(\Delta_{c_1} - \Delta_{c_2}), \%$	47	101	-14	167

Враховуючи середні значення абсолютних похибок векторів можна зробити висновок про підвищення точності для 75% синхронних RTK-визначень у порівнянні з одиничними вимірюваннями. Підтвердженням підвищення точності RTK-режиму є визначення вектора від станцій перманентної мережі БС «Геотераса», що розміщені у населеному пункті Новодністровськ за програмою спостережень №3. На рис. 6 подано часова серія визначення вектора в режимі синхронних RTK (а) та класичних RTK (б) від перманентної станції NDNS, що є на віддалі 5 км.

Дослідження розсинхронності визначення вектора виконано на локації 2. РП були встановлені на пунктах з примусовим центруванням. Одночасно виконували запис координат від перманентної станції МУКО та Sulp на віддалях 35 км та 0,2 км відповідно. Частота синхронного запису для двох станцій була 5с, а тривалість 25 хв. Від кожної станції зібрано по 300 вимірів. За формулою (5) обчислювався вектор, а за формулою (8) – середня абсолютна похибка.

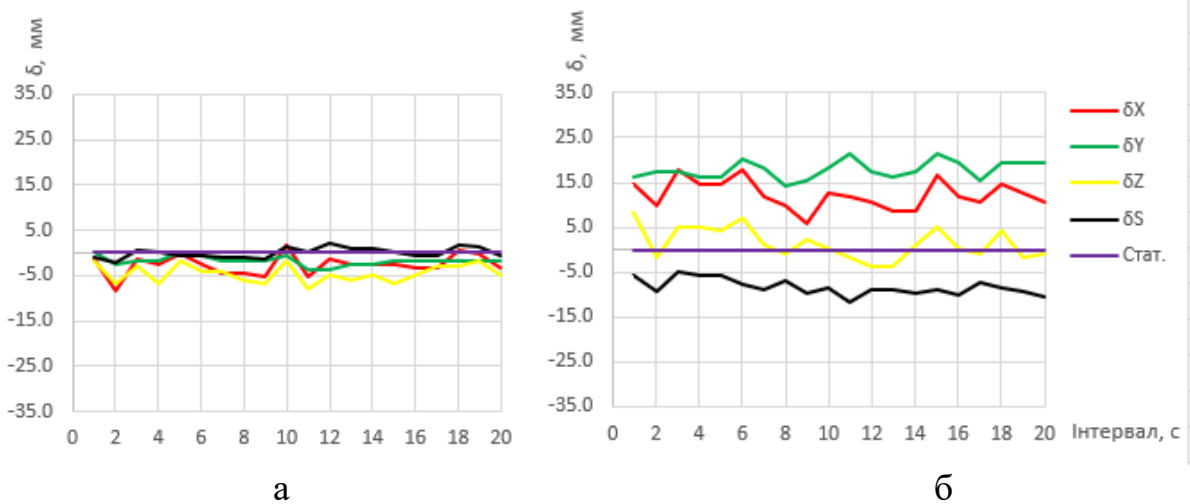


Рис. 6. Часова серія вектор ogz-3 – ogz-4 від перманентної станції NDNS синхронних RTK (а) та RTK-режимах (б)

Для дослідження впливу розсинхронності RTK-векторів побудовані часові серії приростів координат, визначених за формулою (6). Виконано усереднення з десяти вимірювань із всієї вибірки вимірювань. Отримано 30 інтервалів тривалістю 50 секунд кожен. За результатами дослідження спостерігається висока повторюваність часових серій початку та кінця вектора. Апроксимовані часові ряди візуально повторюють один одного. Проте зміщення функцій початку та кінця вектора приводить до припущення про похибку первинної ініціалізації. Усереднені значення часових рядів підтверджують їх подібність та похибку первинної ініціалізації. Щодо синхронності спостережень, то з дослідження необхідно забезпечити точність і синхронізацію даних на рівні дискретності запису. Дискретність запису слід вибирати від 1 до 5 секунд і виконувати мінімум 10 усереднень. З виконаних досліджень можна зробити висновок про дотримання спеціальної програми спостережень синхронних RTK-векторів. За таких налаштувань, визначення координат буде тривати 120 секунд. Записавши 20 спостережень в оперативну пам'ять програми, алгоритм перевірить на допуск критеріям та зафіксує середнє значення координат у пам'ять. Визначення координат в RTK-режимі за такими критеріями доступно у нових прикладних програмах CUBE-а виробництва Stonex. Такі визначення не виключають систематичні похибки центрування, виміру висоти антени, тому для виключення таких похибок визначення векторів за програмою «Контрольна точка» необхідно виконувати мінімум 2-3 рази.

З метою встановлення ефективності створення прецензійних комбінованих ГНСС-мереж, побудованих методами статичним та синхронних RTK вимірювань, проведено апостеріорну оптимізацію всієї сукупності вимірюваних векторів. Ми використали методику апостеріорної оптимізації, де виділялись два параметри: μ – середня квадратична похибка одиниці ваги та q – жорсткість мережі. Між параметрами μ та q існує певний взаємозв'язок, який визначається співвідношенням між точністю обчислення компонент мережі та її достовірністю. Методика полягає у почерговому вилученні векторів із максимальним значенням функції

$$\frac{v}{q_i - q_{k-1}} = \max, \quad (9)$$

де v – поправки у виміряні вектори, $q = F(Q)$ – параметр жорсткості мережі, який встановлюється як функція кореляційної матриці вимірів $Q = (A^T P A)^{-1}$. Поправки v обчислювались з послідовних ітерацій урівноваженням мережі із матричного рівняння:

$$v = A \cdot \Delta x + L, \quad (10)$$

де A – матриця коефіцієнтів рівнянь поправок, Δx – поправки у наближені значення шуканих параметрів, які обчислювались з урівноваження, L – матриця – вектор вільних членів. Після кожної ітерації визначали СКП одиниці ваги:

$$\mu_{ур} = \sqrt{\frac{\sum v^2}{r}}, \quad (11)$$

де r – кількість надлишкових вимірів у мережі. Методика апостеріорної оптимізації передбачає поділ вибірки векторів на три групи. У першій групі параметр μ – стрімко зменшується, параметр q – залишається незмінним. Ця група містить вектори з максимальними похибками, крім цього вплив цих векторів на жорсткість мережі є мінімальним. У другій групі параметр μ повільно зменшується, параметр q повільно зростає. Ця група надлишкових векторів підвищує точність і жорсткість мережі. У третій групі параметр μ повільно зменшується, але q стрімко зростає. Тобто третя група – це мінімальна кількість векторів, які необхідні для утворення жорсткої мережі. Точка перетину кривих обох других похідних є точкою максимальної ентропії мережі, тобто найбільш ефективного співвідношення між точністю та жорсткістю мережі. Мережа з видаленими до цієї межі векторами є оптимальною за співвідношенням точність і жорсткість. Зазначена методика була використана для фільтрування всієї сукупності векторів досліджуваної нами мережі. За параметр – «загальна кількість векторів» прийнято – 605 векторів, з них 519 визначених у статичному режимі та 86 – в RTK. Був застосований алгоритм фільтрування (вилучення) вектора з максимальною похибкою μ . Після вилучення такого вектора, мережу знову врівноважували і визначали вектор з максимальною похибкою, який також вилучався. Така процедура вилучення продовжувалась до тих пір доки не залишалась мінімальна кількість векторів необхідних для визначення координат пунктів (межа другої та третьої групи). У першій групі вилучено 80 векторів: 49 статичних (61%) та 31 RTK (39%). Статистика підтверджувала практично однакову точність статичних та RTK векторів першої групи, але їх точність була низькою і потребувала видалення. У другій групі вилучено 401 вектори: 353 статичних (88%) та 48 RTK (12%). Звернувши увагу на відсоткове співвідношення загальної кількості векторів (86% – статичних та 14% – RTK), можна зробити висновок про практично рівномірне виключення статичних та RTK векторів. Це є показником високої точності визначення векторів в RTK режимі запропонованою нами методикою. У третій групі залишились найточніші 114 векторів з них 107 (94%) – статичних та 7 (6%) – RTK.

Оскільки точність ГНСС-технології є на порядок вищою від класичних методів створення геодезичних мереж (див. табл. 1), то для роботи у таких мережах виникає необхідність їх трансформування. Існує декілька методів трансформування координат з однієї системи в іншу. Серед найбільш відомих є такі: поліноміальне

трансформування, трансформування за методом Гельмерта, за допомогою сплайну Ерміта-Оверхаузера, афінне трансформування, афінне трансформування методом скінченних елементів. Вибір методів трансформування залежить від властивостей отриманих результатів. Ми пропонуємо покрокову трансформацію, яка дозволяє підтримувати у часі трансформаційне поле в системі координат інженерного об'єкта. Нами для формалізації поля залишкових деформацій запропоновано та апробовано метод лінійної інтерполяції, в якому для кожного пункту локальної мережі складаються рівняння (12):

$$\begin{aligned} a_x \cdot B_n + b_x \cdot L_n + c_x &= (x_n - x_{ГТТ}) \\ a_y \cdot B_n + b_y \cdot L_n + c_y &= (y_n - y_{ГТТ}) \end{aligned} \quad (12)$$

де: $a_x, b_x, c_x, a_y, b_y, c_y$ – невідомі коефіцієнти, B_n, L_n – широта та довгота точок локальної мережі Дністровської ГАЕС, $x_n, y_n, x_{ГТТ}, y_{ГТТ}$ – координати точок локальної мережі Дністровської ГАЕС у проміжній та ГТТ системах координат. Методом ітерацій за способом найменших квадратів визначали невідомі, та виконували оцінку точності. Ітераційний підхід забезпечив можливість видалення пунктів з максимальними похибками. Ітераційний процес завершувався при повільній зміні точності визначених параметрів. За визначеними значеннями коефіцієнтів обчислювалися залишкові деформації у північному та східному напрямках для точок розміщених у вузлах сітки, яка покривала усю територію Дністровської ГАЕС. На рис. 7 графічно подано планове та висотне трансформаційне поле Дністровської ГАЕС. Крок сітки складав 1" по широті та довготі, що відповідає на місцевості відстаням ≈ 30 м та 20 м. Щільність такої сітки повністю задовольняє інтерполяцію для визначення складових зміщень залишкової деформації в 1 мм. За даним алгоритмом розроблена програма, яка дозволяє визначити оптимальні для даного регіону параметри перетворень координат.

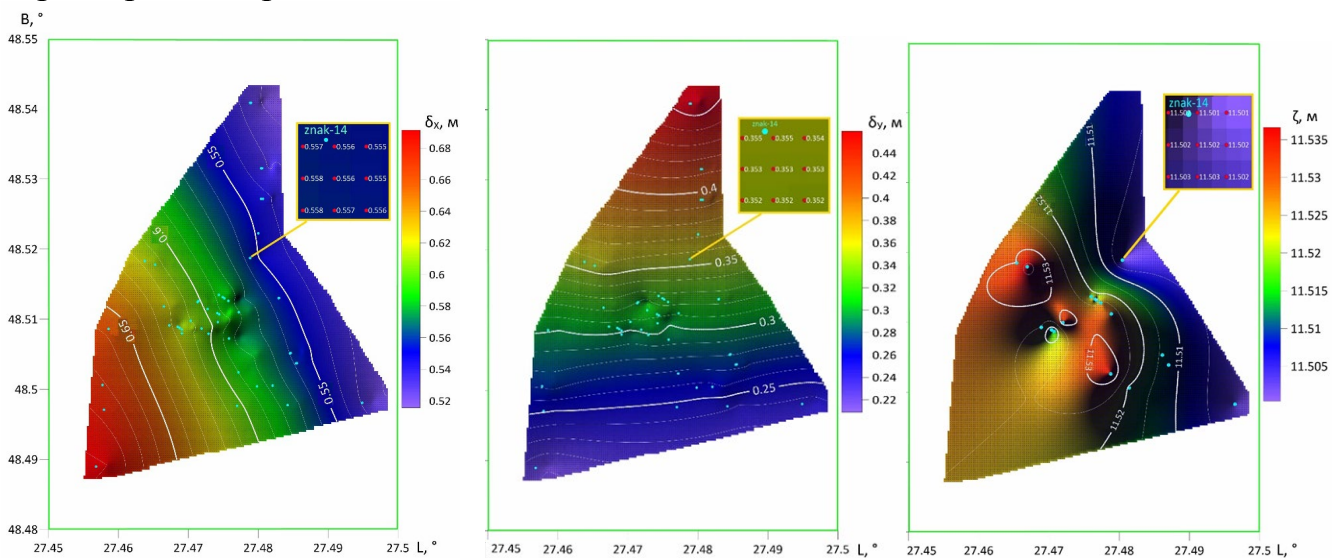


Рис. 7. Модель трансформаційного поля ГТТ Дністровської ГАЕС

У третьому розділі дисертації «Дослідження електронних тахеометрів для підвищення точності інженерно-геодезичних робіт» розглянуто можливість

підвищення точності вимірювання електронним тахеометром (ЕТ). Для цього досліджено вплив похибок геометричних конструктивних елементів ЕТ на вимірювані ним горизонтальні та вертикальні напрямки. Експериментальні вимірювання проводили у різний час доби та за різного значення температури середовища. Визначення калібрувальних елементів виконували у три прийоми з СКП, що не перевищила 2" (див. табл. 6).

Таблиця 6

Кутові калібрувальні елементи ЕТ Leica TCR1201R300,

Дата Елемент	Калібрувальні елементи ЕТ				
	$l, ''$	$t, ''$	$M0, ''$	$c, ''$	$a, ''$
16.02.21	1	3	8	4	8
13.09.21	4	3	9	6	2
13.01.22	3	7	6	6	1
01.07.22	6	9	9	1	2

Значна зміна (до 7") калібрувальних елементів у різний період року підтверджує необхідність правильного їх визначення, оскільки їх вводять як систематичну похибку у виміряні напрямки. Деякі калібрувальні елементи виключаються під час вимірювань при двох положеннях круга, деякі залишаються. Причиною їх зміни може бути зміна метеоумов навколишнього середовища. У дисертації також досліджено вплив калібрувальних елементів на вимірювальні напрямки на колімаційній установці (тільки на горизонтальній коліматор). Виконано дванадцять установок з перестановкою круга на 30^0 . Для кожної установки ЕТ виконували три прийоми вимірювань та визначали колімаційну похибку (С) та місце нуля (M0). Таке дослідження дало можливість довести мінімізацію впливу ексцентриситету горизонтального круга у ЕТ з двома зчитувачами (див. рис. 8). На графіках також подано СКП значень та їх апроксимацію прямою. Систематичний вплив на горизонтальні напрямки має також похибка перефокусування, яку ми визначали на 100-метровому базисі. Базис складався із семи світловідбивних марок закріплених на одній висоті та в створі. Ми встановили значний вплив перефокусування на зміну С та M0 для ЕТ на віддалі до 8 м. На віддалі більше 8 метрів та до безмежності впливу перефокусування на зміну С та M0 на виявлено. Ми виконали також дослідження визначення похибки вимірювання віддалі на коротких довжинах з використанням кулькового відбивача. Використання такого відбивача під час вимірювань повинно виключити похибку фіксації, центрування та горизонтування візирної цілі. За еталон був використаний лазерний інтерферометр переміщень. Під час вимірювань кут падіння лазера на відбивач дорівнював 90^0 . Порівнянням еталонних та виміряних відрізків встановлено, що СКП визначення віддалей у діапазоні довжин 6-16 м при використанні кулькового відбивача становить 0,17 мм. Крім того, нами проведено дослідження впливу неперпендикулярності вимірювального лазера до кулькового відбивача китайського виробництва. Для цього на підставку відбивача закріплювалась радіальна шкала. Відбивач повертали в кутовому інтервалі від -40^0 до $+40^0$ з дискретністю 10^0 . Результати дослідження подано на рис. 10 а. На рис. 10 б, для

порівняння отриманих результатів, подано вплив кута неперпендикулярності вимірювального лазера на сферичний відбивач німецького виробника виконаного німецьким інститутом метрології. Хоча відбивачі двох виробників мають однакову точність виготовлення, але за неперпендикулярності вимірювального лазера відбивач китайського виробництва значно поступається у точності німецькому.

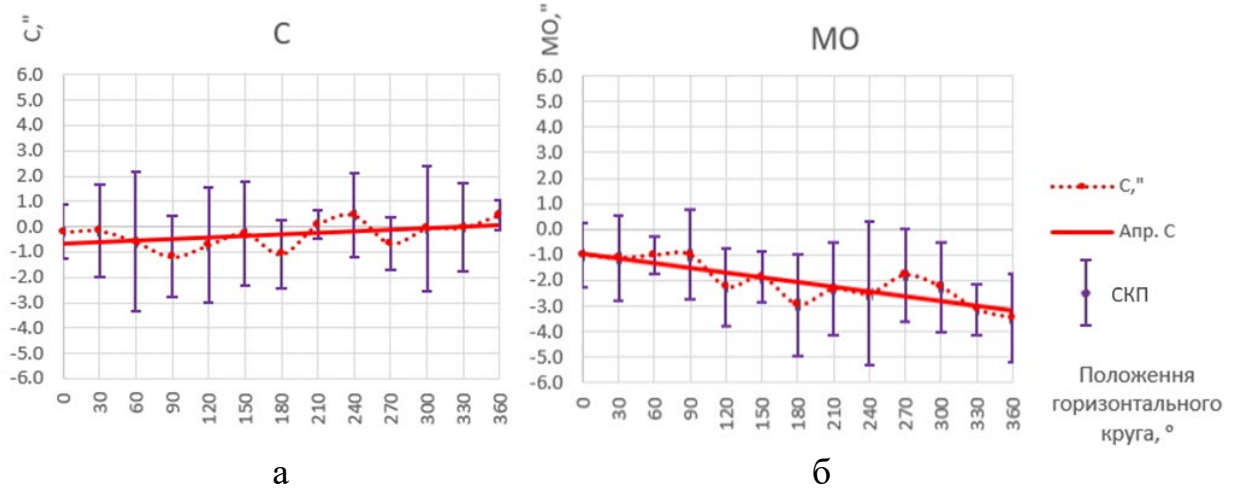


Рис. 8. Значення колімаційної похибки (а) та місця нуля (б) на різних установках горизонтального круга для електронного тахеометра TCR1201+R300

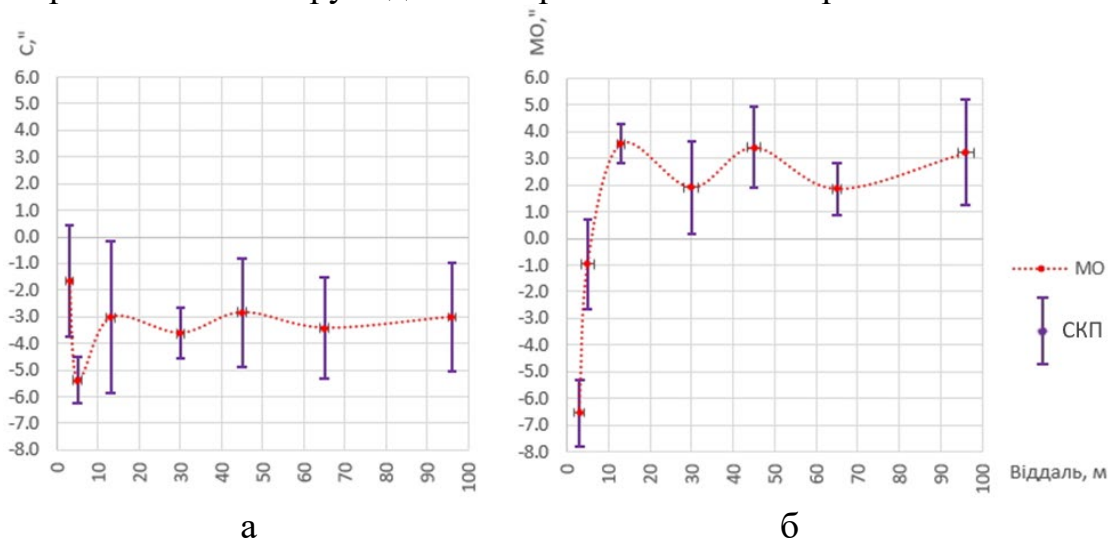


Рис. 9. Зміни колімаційної похибки (а) та місця нуля (б) від зміни фокусування для електронного тахеометра TCRP1201 R300

Розроблений нами кульковий відбивач (рис. 11) складається з наступних елементів: 1 – куля необхідного діаметру залежна від діаметра трипельпризми, 2 – пружинна пластина, 3 – трипельпризма, 4 – прижимна шайба, 5 – закріпна шайба, 6 – центр сфери, 7 – оптичний центр трипельпризми. Така конструкція дає можливість сумістити центр сфери та центр трипельпризми з точністю 0,1 мм, що забезпечить при вимірюванні незмінність координат центру трипельпризми навіть при розвороті сфери на кут 30° , що відповідає рис. 10 б. Для додаткової компенсації систематичних похибок вимірювання віддалей ЕТ, нами теоретично опрацьовано та апробовано лінійно-кутовий спосіб. Результатом теоретичного опрацьовання є виведена формула (13). За формулою можна розрахувати оптимальні віддалі l залежно від метрологічних характеристик ЕТ (m_{d_1/d_2} , m_γ) та довжини визначуваного

відрізка c . Результатом апробації є розробка спеціального пристрою для центрування геодезичної марки, вимірювання на базисі II розряду та на марку закріплену на мікрометрі переміщень. Дані дослідження підтвердили теоретичні розрахунки і забезпечили точність 0,2 мм на 50 м. Даний спосіб вимірювань відрізків є частиною методики побудови геодезичних мереж в умовах обмеженого простору.

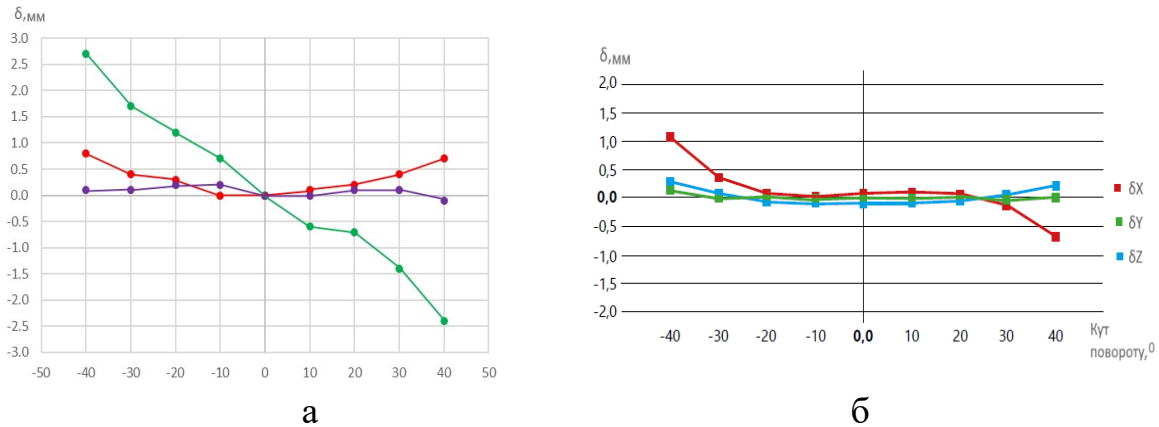


Рис. 10. Вплив неперпендикулярності вимірювального лазера на координати визначуваної точки на відбивач китайського (а) та німецького (б) виробництва

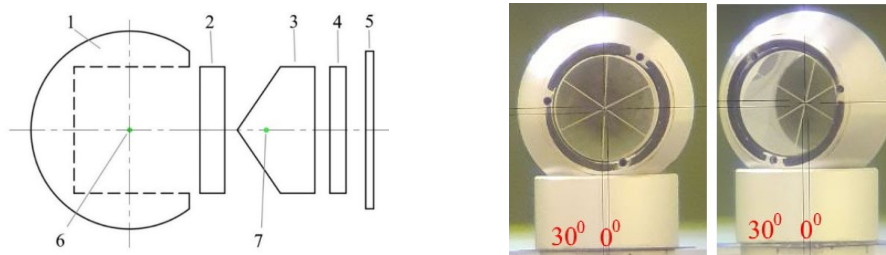
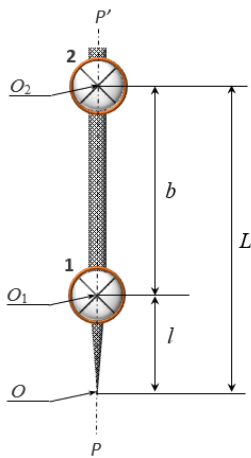


Рис. 11. Розроблений кульковий відбивач

$$l = \sqrt{\frac{c \cdot m_{d_1/d_2}}{m_\gamma \sqrt{2}}} \rho'' \quad (13)$$

Для визначення розмірів споруд неправильної форми виникає необхідність у розробці давача, який можна довільно встановлювати та визначати координати вістря. Ми дослідили та розробили двопризмовий давач-вектор (рис. 14). А також розробили теорію визначення координат вістря давача-вектора за вимірними координатами на відбивачі. Також вивели формули апріорної оцінки точності просторових координат вістря залежно від точності визначення лінійних елементів базису (формула 15), від точності визначення координат оптичних центрів відбивачів (формула 16), та впливу зміни температури на точність визначення координат полюса (формула 17). З апріорних досліджень, зміна температури не впливає на значення безрозмірних елементів базису. У формулі (16) фігурують координати оптичних центрів 1 і 2 відбивачів і на практиці їх обчислюють за результатами вимірювань ЕТ. Отже, якщо коефіцієнт q не залежить від зміни температури, а координати визначають незалежно, то тоді температурний розтяг/стиск не впливає на результати визначення координат точки полюсу. Точність визначення просторових координат давачем-вектором досліджувалась з використанням кінцевої міри. У трьох положеннях у просторі на віддальх 6, 10 та 18

м від електронного тахеометра по черзі фіксували кінцеву міру. Середня абсолютна похибка з трьох визначень дорівнювала 0,3 мм.



PP' – головна вісь базису;
 1, 2 – відбиваючі призми;
 O – полюс базису;
 O_1, O_2 – оптичні центри відбиваючих призм 1 та 2;
 L – полярна відстань точки O_2 (відстань між полюсом базиса O та оптичним центром відбивача 2);
 l – полярна відстань точки O_1 (відстань між полюсом базиса O та оптичним центром відбивача 1);
 b – базис (відстань між оптичними центрами відбивачів 1 (точка O_1) і 2 (точка O_2));

Рис. 14. Основні елементи двопризмового давача-вектора

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_1 - \frac{l}{b}(x_2 - x_1) \\ y_0 &= y_1 - \frac{l}{b}(y_2 - y_1) \\ z_0 &= z_1 - \frac{l}{b}(z_2 - z_1) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

$$M_0^2 = \sqrt{1 + q^2} m_{in}^2, \quad (15)$$

$$M_0^2 = \sqrt{(1 + q)^2 + q^2} M_p, \quad (16)$$

$$q = \frac{l}{b} = \frac{l_0(1 + \tau(t - t_0))}{b_0(1 + \tau(t - t_0))} = \frac{l_0}{b_0}. \quad (17)$$

В дисертації виконана апробація методики побудови геодезичних мереж в умовах обмеженого простору в лабораторії Інституту геодезії. Мережу закріплено чотирма настінними пунктами примусового центрування. Розраховано оптимальні віддалі встановлення електронного тахеометра (формула 13), виконано вимірювання горизонтальних та вертикальних напрямів та розраховано шість векторів. В програмному середовищі Mathcad виконано врівноваження мережі та обчислено координати пунктів. Також незалежно з двох точок ми виконали вимірювання у експериментальній мережі та врівноважили її як лінійно-кутову у програмі МГ Мережі. Різниці координат пунктів 3 та 4 були такими: у напрямку «Х» +0,3 та -0,7 мм, у напрямку «У» +2,7 та +3,4 мм, у напрямку «Z» +0,3 та +0,4 мм. Оскільки у першому випадку вектори, які утворювали геодезичну мережу, визначались за оптимальної геометричної конфігурації, то така мережа є точнішою. Врівноваження мережі забезпечило точність просторового положення пунктів 0,3 мм. Із застосуванням запропонованої методики нами було закладено геодезичну мережу, врівноважено та визначено координати чотирьох пунктів на Запоріжській АЕС. Ці пункти використано як геодезичну основу для відновлення проєктного положення статора генератора ТВВ-1000 при його заміні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вдосконалено вирішення науково-практичного завдання підвищення точності і достовірності виконання інженерно-геодезичних вимірювань технологічного обладнання і геометрії будівельних об'єктів. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи такі:

1. Аналіз стану та основних тенденцій у розробленні інструкцій, настанов, ДСТУ та ДБН у галузі геодезичного забезпечення будівництва показав, що не всі положення у них є актуальними і це спонукало до детальних досліджень сучасного геодезичного обладнання для підвищення точності вимірювання за розробленими методиками.

2. Розроблено методику оптимізації побудови геодезичних мереж з використанням статичних та синхронних RTK-векторів, визначених ГНСС-методом, яка узгоджена із заданою точністю та економічною ефективністю.

3. Запропоновано методику трансформації просторових координат кінематичних геодезичних мереж, яка дозволяє підтримувати трансформаційне поле для системи координат динамічно змінного інженерного об'єкта. Експериментальна перевірка трансформаційного поля Дністровської ГАЕС показала, що максимальні розбіжності в координатах становлять 5 мм для планового положення і за висотою – 20 мм. Параметри перетворень впроваджені у програмне забезпечення CDC.NET та відкрито канал доступу до мережі «Геотераса», яка передає диференційні поправки трансформаційного поля Дністровської ГАЕС авторизованим користувачам.

4. Теоретично обґрунтовано та запропоновано методику підвищення точності вимірювання віддалей лінійно-кутовим способом ЕТ з врахуванням його метрологічних характеристик, що забезпечує точність 0,2 мм на 50 м.

5. Розроблено обладнання : світловідбивний плівковий та кульковий відбивачі, а також давач-вектор для вимірювання параметрів інженерних споруд неправильної форми, з використанням яких компенсується вплив систематичних похибок вимірювань.

6. Розроблено методику визначення параметрів інженерних споруд в умовах обмеженого простору з використанням ЕТ, яка забезпечує точність 0,5 мм. Таку методику пропонується використовувати на інженерних об'єктах для встановлення в проєктне положення технологічного обладнання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових виданнях, що входять міжнародних наукометричних баз даних:

1. Litynskyi, V., Litynskyi, S., & Brydun, A. (2019). The accuracy investigation of point coordinates' determination using a fixed basis for high-precision geodesy binding. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 107 (1), 19-23.
2. Vivat, A., Tretyak, K., & Lano, O. (2022). Investigation of determining the accuracy of spatial vectors by the satellite method in a real time mode. Journal of Applied Geodesy.

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Антонюк, В., Астаф'єв, В., & Шевченко, Т. (2006). Комплексна реалізація методу встановлення обладнання в проектне положення з використанням сучасного та традиційного геодезичного обладнання. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, (67), 10-16.
4. Віват, А. Й. (2017). Дослідження точності визначення нормальних перевищень методом GNSS. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільське господарство*, (18), 11-19.
5. Віват, А. Й., Кордуба, Ю. Г., & Петров, С. Л. (2020). Дослідження впливу температури на зміну розміру контрольних лінійок із використанням індикатора годинникового типу. *Технічні науки та технології*, (3 (21)), 310-318.
6. Віват, А. Й., Літинський, В. О., & Покотило, І. Я. (2011). Дослідження точності визначення координат GNSS методом у режимі RTK. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 52-59.
7. Літинський, В., Віват, А., & Літинський, С. (2015). Спосіб вимірювання взірцевого базису 2-го розряду для еталонування електронних тахеометрів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, (81), 59-65.
8. Літинський, В., Віват, А., & Герасименко, Є. (2014). Методика визначення інтервалів нівелірних рейок електронним тахеометром. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, (1), 34-37.
9. Савчук, С., Тревого, І., & Віват, А. (2003). Обробка GPS-спостережень наукового геодезичного полігону. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, (1), 39-47.
10. Fys, M., Litynskyi, V., & Litynskyi S., (2021). Investigation of formulas determination of a point's plane coordinates by the invers linear-angular resection. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 94, (20-28).
11. Vivat, A., & Nazarchuk, N. (2019). Дослідження методики застосування скануючого тахеометра Topcon is301 для побудови просторових моделей архітектурних форм. *Інженерна геодезія*, (67), 35-45.
12. Vivat, A., Petrov S., & Volkova V. (2022). Development methods of large-equipment installation in design position using electronic total stations. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 95, (22-30).
13. Vivat, A., Tserklevych, A., & Smirnova, O. (2018). A study of devices used for geometric parameter measurement of engineering building construction. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 87, 21-29.
14. Tserklevych, A., Vivat, A., & Petrov S. (2022). Engineering solutions for increasing the accuracy of geodesic measurements by total stations. *Geodesy, Cartography, and Aerial Photography*, 96, (58-69).

АНОТАЦІЯ

Віват А.Й. «Удосконалення геодезичних методів підвищення точності вимірювань в інженерно-геодезичних роботах».

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 *Геодезія, фотограмметрія та картографія*. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України. Львів, 2023.

Дисертація присвячена вдосконаленню геодезичних методів підвищення точності вимірювань в інженерно-геодезичних роботах. Протягом багатьох десятиліть опрацьовані різні, що вже стали традиційними, геодезичні методи та технології інженерно-геодезичних робіт: мікротріангуляція, трилатерація, гідронівелювання, високоточні створні вимірювання, променеві та інтерференційні лазерні системи тощо. Усі ці методи та засоби геодезичних вимірювань добре вивчені та викладені в наукових працях, підручниках, монографіях та вивчаються у навчальних закладах майбутніми спеціалістами з інженерної геодезії. Цими методами та засобами виконували контроль планово-висотних деформацій найбільших ГЕС, ГАЕС, АЕС, ГЗК, висотних споруд тощо. Однак сучасні методи будівництва для дотримання технологічного процесу вимагають розробки нових методик та інструментарію, особливо в умовах обмеженого планування. До інженерних споруд, які потребують геодезичного забезпечення, відносять атомні-, гідро-, теплоелектростанції, тунелі, мости, висотні будівлі. Важливість виконання геодезичних робіт на всіх етапах будівництва, які супроводжуються точнішою реалізацією проєктних розрахунків, забезпечує збільшення терміну експлуатації інженерних споруд. Важливість інженерно-геодезичного забезпечення як складової частини системи якості є пріоритетною в будівництві. Тому питання його удосконалення має велике значення і в майбутньому така тенденція буде зростати. Узагальнені інженерно-геодезичні роботи, які розглянуто у першому розділі, можна технологічно об'єднати за такими напрямками:

1. Геодезичне забезпечення інженерних споруд координатною основою ДГМ.
2. Геодезичне забезпечення інженерних споруд під час їх зведення та експлуатації.
3. Геодезичне забезпечення монтажу технологічного обладнання інженерних споруд.

Аналіз пункту 1 засвідчив, що проблеми однорідної точності координатного забезпечення малих інженерних споруд вирішено введенням у виробництво УСК2000. Це забезпечило середню СКП визначення координат на рівні 3 см для всієї території України. Щодо геодезичних мереж великих інженерних об'єктів, то їхні нормативні похибки залишились на рівні застарілих технологій вимірювань. Активний розвиток в Україні мереж перманентних БС дає можливість використовувати нові ГНСС методи в режимі реального часу для забезпечення координатною основою інженерних споруд.

Щодо геодезичного забезпечення інженерних об'єктів під час їх зведення та експлуатації, то зазначимо, що в Україні такі роботи регламентують відповідні ДБН. У них описані види робіт, обладнання та регламентована точність. Оскільки

геодезичні мережі на таких об'єктах проєктуються в обмежених умовах, то виникає потреба в розробці нових методик вимірювань та розвитку спеціальних геодезичних мереж.

Геодезичне забезпечення монтажу технологічного обладнання на інженерних об'єктах в Україні також регламентується відповідними нормативними вимогами. Ці норми визначають точність та методи виконання робіт. В Україні вивірення прямолінійності, співвісності, горизонтальності, висотності, нахиленості, вертикальності, паралельності, перпендикулярності, площинності, кривинності виконують спеціальним обладнанням автоколімаційними теодолітами, інварними дротами, каліброваними пристроями, оптичними трубами із центрошукачами. У світовій практиці давно набули поширення методи, що базуються на використанні сучасних електронних приладів, як такі, що є в разі ефективніші, продуктивніші та менш часозатратні. Тому постає питання впровадження таких технологій в українське виробництво. Вище перелічені проблемні питання розглянуто у першому розділі.

У другому розділі з метою вдосконалення геодезичного забезпечення великих інженерних споруд координатною основою виконано:

1. Дослідження точності RTK-режиму ГНСС-вимірювань залежно від віддалі до базової станції, кількості сузір'їв супутників, кількості епох та виду зв'язку.

2. Дослідження можливості побудови геодезичних мереж з використанням статичних та синхронних RTK ГНСС-векторів.

3. Трансформацію планових координат із системи ETRF-2000 до системи ГТТ Дністровської ГАЕС. Розраховані параметри перетворення, які впроваджені у ПЗ CDC-NET для формування диференційних поправок на територію Дністровської ГАЕС.

З метою перетворення еліпсоїдальних висот системи ETRF-2000 до системи нормальних висот ГТТ Дністровської ГАЕС створена регулярна сітка висот квазігеоїда, яка завантажена у ПЗ CDC-NET для передачі диференційних поправок у геодезичні висоти.

У третьому розділі з метою підвищення точності визначення параметрів інженерних споруд електронними тахеометрами та відповідно до інструкцій геодезичного виробництва, удосконалено методики та приладдя для послаблення впливу інструментальних похибок на вимірювання електронними тахеометрами, а саме:

1. Методика підвищення точності вимірювання віддалей електронними тахеометрами лінійно-кутовим способом.

2. Пристрій для підвищення точності вимірювань віддалі лінійно-кутовим способом між пунктами, центри яких задані отвором.

3. Візирну ціль, кульковий відбивач та двопризмовий давач-вектор для визначення геометричних параметрів інженерних споруд у просторі. Виконано аналіз електронних тахеометрів та їх використання у світовій практиці. Досліджено метрологічні характеристики електронних тахеометрів різних виробників, подано необхідність їх правильного визначення на спеціальних установках.

Ключові слова: підвищення точності геодезичних вимірювань, високоточні геодезичні вимірювання, методика підвищення точності вимірювань, дослідження точності ГНСС-приймачів, RTK-режим, дослідження електронних тахеометрів, лінійно-кутові вимірювання, оптимізація геодезичних вимірювань.

SUMMARY

Vivat A.I. Improving geodetic techniques of increasing the measuring accuracy during engineering surveying operations. – Qualifying scientific work published as a manuscript. Thesis for a PhD degree in Technical Sciences on specialty 05.24.01 – Geodesy, Photogrammetry and Cartography. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine. Lviv, 2023.

The thesis is devoted to improving geodetic techniques of increasing measuring accuracy and efficiency of measurements during engineering surveying operations. For many decades, different geodetic methods and techniques have been developed, many of whom having become the classical ones: micro-triangulation, trilateration, hydro leveling, high precision alignment survey, beam and interference laser systems etc. All these methods and means of geodetic measurements have been investigated quite well and described in scientific papers, manuals and monographs, and are being studied at universities by future specialists in engineering geodesy. These methods and means were used for monitoring of vertical deformations of the biggest hydropower plants, pumped-storage plants, nuclear power plants, mining complexes, high-rise buildings etc. However, modern construction approaches require new techniques and tools to be developed, especially under the conditions of limited planning. Engineering structures which need geodetic treatment are nuclear power plants, hydropower plants, thermal power stations, tunnels, bridges, high-rise buildings. Geodesic works are vitally important at all stages of construction accompanied with more sophisticated project calculations, since they prolong service life of above mentioned engineering structures. The importance of providing engineering geodesy works as a constituent part of a quality system is a first-priority part of the construction process. Therefore, the issue of its improvement is extremely important and will be even more important in the future.

In general, engineering geodesy works considered in Chapter 1 can be technologically combined into such directions, as:

1. Geodetic works providing a coordinate base of SGN for engineering constructions.
2. Geodetic works provided for engineering constructions during their building.
3. Geodetic works provided while installing technological equipment.

The analysis of Point 1 showed that issues of homogeneous accuracy of coordinate positioning for small engineering facilities was addressed by implementing into production The State Geodetic Reference Coordinate System (USC2000). It provided a MSE of coordinate determination at the level of 3 cm for the whole Ukraine territory. Regarding geodetic networks of big engineering objects, their normative errors stayed at the level of out-of-date measuring techniques. The rapid development of networks of permanent BS enables using new methods of GNSS in a real-time mode for providing the SGN coordinate base for engineering constructions. Considering geodetic works provided for engineering constructions during their building and exploitation, we can mention that in Ukraine such works are regulated by the relevant building codes. They include the

description of kinds of works, equipment for them and regulated accuracy. Since geodetic networks at such objects are designed under the limited planning conditions, a need to develop new measuring techniques and special geodetic networks.

Geodetic support for the installation of technological equipment of engineering structures in Ukraine is regulated by the corresponding regulatory requirements. These norms determine the accuracy and methods of performance of works. In Ukraine, checks of straightness, equiaxality, horizontality, height, inclination, verticality, parallelism, perpendicularity, flatness, and curvature are carried out with special equipment, autocollimation theodolites, invar wires, gauges, optical tubes with center finders. In world practice, methods based on the use of modern electronic devices, which are much more effective, productive and less time-consuming, have long been widespread. Therefore, the question of introducing such technologies into Ukrainian production arises.

In Chapter 2, with the aim of improving the geodetic support of large engineering structures, the coordinate base is used to:

1. Investigation of the accuracy of the RTK mode of GNSS measurements depending on the distance to the base station, the number of satellite constellations, the number of epochs and the type of communication.
2. Researching the possibility of building geodetic networks using static and synchronous RTK GNSS vectors.
3. Transformation of the planned coordinates from the ETRF-2000 system to the GTT system of the Dniester PSPP. The calculated parameters of the transformation are implemented in the CDC-NET software for the formation of differential corrections of the Dniester Gas Station.

In order to convert the ellipsoidal heights of the ETRF-2000 system to the system of normal heights of the GTT of the Dniester Gas Power Plant, a regular grid of quasi-geoid heights was created, which was loaded into the CDC-NET software for transferring differential corrections to geodetic heights.

In Chapter 3, in order to increase the accuracy of determining the parameters of engineering structures by electronic total stations and in accordance with the geodetic production instructions, the methods and equipment for reducing the influence of instrumental errors on measurements by electronic total stations have been improved, namely: a method of increasing the accuracy of distance measurement by electronic total stations using the linear-angular method, a device for increasing the accuracy of distance measurements in a linear-angular way between points, the centers of which are given by the hole, a sighting target, a cross-beam reflector and a two-point sensor-vector for determining the geometric parameters of engineering structures in space. An analysis of electronic tacheometers and their use in global practice was also performed. The main technical characteristics of electronic tacheometers of various manufacturers have been summarized, the need for their correct determination on special installations has been presented.

Keywords: increasing the accuracy of geodetic measurements, high-precision geodetic measurements, methods of increasing the accuracy of measurements, researching the accuracy of GNSS receivers, RTK-mode, researching electronic total stations, linear-angular measurements, optimization of geodetic measurements.