

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

**ПЕРІЙ Сергій Сергійович**

УДК 528.3

**ТЕОРЕТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ  
ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТРИГОНОМЕТРИЧНОГО ТА  
ГЕОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ**

**05.24.01 - Геодезія, фотограмметрія та картографія**

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**ЛЬВІВ – 2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої геодезії і астрономії Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор  
**ТРЕТЯК Корнилій Романович**,  
Національний університет “Львівська  
політехніка”, директор інституту геодезії.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор  
**САМОЙЛЕНКО Олександр Миколайович**,  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури,  
професор кафедри інженерної геодезії,  
Директор науково-виробничого інституту  
метрологічного забезпечення геометричних,  
механічних та віброакустичних величин (№4);

доктор технічних наук, професор  
**КУЛКОВСЬКА Ольга Євгенівна**,  
Криворізький національний університет,  
професор кафедри геодезії;

доктор технічних наук, доцент  
**КАБЛАК Наталія Іванівна**,  
Ужгородський національний університет, доцент  
кафедри міського будівництва і господарства.

Захист відбудеться « 06 » грудня 2019 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «       »                               2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.12, к.т.н., доц.



**Б.Б. Паляниця**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Основним напрямком державної політики щодо забезпечення техногенно-екологічної безпеки в Україні є положення та заходи, затверджені постановою Верховної Ради України від 5 березня 1998р. Запобігання і мінімізація наслідків надзвичайних ситуацій з урахуванням ризику їх виникнення є пріоритетним напрямком державної політики. Основними заходами, що запобігають виникненню надзвичайних ситуацій техногенного походження на потенційно небезпечних об'єктах, є:

- контроль стану функціонування об'єктів;
- удосконалення технологічних процесів контролювання стану об'єктів;
- упровадження технічних заходів, які забезпечують систематичний контроль, спрямований на запобігання аварій;
- геодезичний моніторинг об'єктів і навколишнього середовища.

Виконання геодезичного моніторингу великих промислових об'єктів та навколишнього середовища, розробка й застосування надійних систем спостережень, оперативне опрацювання результатів вимірів забезпечить отримання якісних оцінок, а також прогнозування виникнення катастроф, стихійних лих або надзвичайних ситуацій.

Кінець ХХ століття характеризувався розвитком технологій, які здебільшого стали екологічно небезпечними для людства. Конструкції агрегатів, дамб, реакторів та інших споруд потребують на сьогодні моніторингових спостережень. Однією зі складових контролю є висота конструктивних елементів об'єкта спостереження в режимі реального часу. Це ставить відповідні вимоги до виконання моніторингових спостережень, як за точністю, так і за новими методами і способами нівелювання, їх своєчасністю та репрезентативністю отриманих результатів. Основними напрямками в реалізації спостережень є автоматизація процесу моніторингу, виключення людського фактору та впливу на точність спостережень, опрацювання результатів у реальному часі та висока точність прогнозування процесів.

Розвиток високоточних електронних тахеометрів, кодових теодолітів і цифрових нівелірів дозволив суттєво покращити приладову точність вимірювання кутових і лінійних величин. Так, наприклад, сучасні електронні геодезичні прилади забезпечують точність кутових відлічувань кодових кругів до десятих часток кутової секунди, ліній до 0.5 мм, відлічування кодової рейки до 0.01 мм. А це, своєю чергою, зумовило завдання щодо створення нових і вдосконалення наявних методів нівелювання.

Основним джерелом похибок, що суттєво впливає на точність нівелювання та складно піддається виключенню в приземному прошарку атмосфери, є вертикальна рефракція.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота відповідає науковим напрямкам кафедри вищої геодезії та астрономії «Моніторинг фізичної поверхні Землі та її атмосфери на основі аналізу результатів сучасних наземних і супутникових вимірювань» та

кафедри геодезії “Дослідження сучасних методів, геодезичних вимірювань та умов їх виконання і опрацювання”. Робота пов’язана з планами, темами і науковою тематикою робіт галузевої науково-дослідної лабораторії “Геодезичного моніторингу та рефрактометрії” (ГНДЛ-18) Інституту геодезії Національного університету “Львівська політехніка”. Протягом останніх 6-ти років автор брав участь у госпдоговірних науково-дослідних роботах “Визначення та прогноз просторових деформацій і напружень інженерних споруд Тересля-Ріцької ГЕС”, держ. реєстр. № 0196U017612; “Визначення і прогноз деформацій будівель дросельного затвору Тересля-Ріцької ГЕС, зосередженої у полі геодинамічних навантажень”, держ. реєстр. № 0196U017613; “Дністровська ГАЕС. Визначення горизонтальних переміщень пунктів опорної геодезичної методом GPS” держ. реєстр. № 0117U0007363; “Виконання геодезичних спостережень за зміщеннями зсувів, опор та труб, розташованих на ділянках нафтопроводів I та II черг Броди Держкордон 32км, 174км” держ. реєстр. № 0117U0004008; “Виконання робіт та надання послуг на користь “Укргідронорго”, пов’язаних з обслуговуванням системи геодезичного моніторингу” тема № 634, замовник компанія “Leica Geosystems” – Швейцарія; виконання та опрацювання результатів високоточних спостережень зі створення геодезичної основи для будівництва Бескидського тунелю.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дослідження - підвищення точності тригонометричного та геометричного нівелювання завдяки впровадженню та використанню сучасних технологій і приладів, врахування атмосферних впливів на результати геодезичних вимірювань у реальній атмосфері.

Реалізація мети дисертаційної роботи передбачає вирішення таких завдань:

1. Проведення аналізу похибок високоточного нівелювання при застосуванні сучасних приладів і технологій.
2. Розроблення рекомендацій щодо підвищення точності та ефективності тригонометричного нівелювання із застосуванням сучасних технологій.
3. Вдосконалення способу тригонометричного нівелювання щодо врахування впливу вертикальної рефракції на результати вимірювань.
4. Розроблення методики застосування тригонометричного нівелювання сумісно із GNSS вимірюваннями для визначення відхилень прямовисних ліній за азимутном спостереження.
5. Розроблення методики прокладання висотних ходів тригонометричного нівелювання із максимальним виключенням похибок, зумовлених впливом вертикальної рефракції та похибок вимірювання висот приладу та візирних цілей.
6. Розробка пропозицій щодо підвищення точності геометричного нівелювання. Розробка способу геометричного нівелювання із застосуванням сучасних приладів і технологій, та врахування вертикальної рефракції.
7. Розробка теорії та створення лабораторного зразку нівеліра-рефрактометра геометричного типу. Дослідження ефективності його

застосування під час виконання геометричного нівелювання для врахування вертикальної рефракції у реальному часі.

8. Розроблення методу врахування вертикальної рефракції у спостереженнях зі створення опорних лінійно-кутових мереж.

9. Розроблення методики врахування вертикальної рефракції під час геодезичних моніторингових спостережень із застосуванням роботизованих тахеометрів.

10. Розроблення методики та програмного забезпечення щодо побудови моделі просторового рефракційного поля за даними моніторингових спостережень та розрахунку поправок у результати вимірювань у реальному часі.

**Об'єкт дослідження** – високоточне геометричне та тригонометричне нівелювання у реальних атмосферних умовах.

**Предмет дослідження** – методи підвищення точності способів геометричного та тригонометричного нівелювань із застосуванням сучасних приладів та технологій.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі використано методи математичного опрацювання геодезичних спостережень, застосовано теоретичні напрацювання статистичної фізики атмосфери у порівнянні з експериментальними даними, отриманими в результаті реальних вимірювань. Для прогнозування і опрацювання експериментальних даних, для побудови моделей рефракційного поля застосовувався кореляційний і регресійний аналізи. Для врівноваження побудованих просторових мереж використовувався спосіб найменших квадратів. Для оцінки точності отриманих результатів застосовувались статистичні методи та диференціальний аналіз.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Дисертаційне дослідження вирішує важливу науково-прикладну проблему підвищення точності й ефективності тригонометричного та геометричного нівелювань. Найвагомими результатами дисертаційного дослідження, що визначають ступінь та характер новизни, є:

*Уперше:*

1. Виведено та теоретично обґрунтовано формулу для визначення перевищення з двосторонніх спостережень із урахуванням вертикальної рефракції за флуктуаціями виміряних перевищень.

2. Розроблено спосіб двостороннього геометричного нівелювання “вперед-назад”, який дозволяє підвищити точність нівелювання завдяки польовому контролю на лінії нівелювання та частковому врахуванню вертикальної рефракції.

3. Виведено формулу для обчислення еквівалентної висоти променя нівелювання за відлічуванням рейки та висоти нівеліра.

4. Розроблено теорію та сконструйовано лабораторний зразок нівеліра-рефрактометра, який визначає величину вертикальної рефракції у момент спостереження.

5. Розроблено теорію та методику дослідження ходу фокусувальної лінзи із урахуванням вертикальної рефракції та кута негоризонтальності променя нівелювання.

***Удосконалено:***

1. Методику застосування двостороннього нівелювання з урахуванням вертикальної рефракції.
2. Методику компарування штрих-кодових рейок.
3. Методику прокладання висотних ходів тригонометричним нівелюванням.
4. Методику побудови дискретного просторового рефракційного поля для безперервних моніторингових спостережень в реальному часі.

***Набули подальшого розвитку:***

1. Теорія і методика неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання.
2. Методика визначення відхилень прямовисних ліній із використанням тригонометричного нівелювання та GNSS - спостережень.
3. Методика врахування вертикальної рефракції у результати геометричного і тригонометричного нівелювань.

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень мають низку практичних застосувань, а саме:

- визначення перевищення з двосторонніх спостережень із урахуванням вертикальної рефракції за флуктуаціями виміряних перевищень може бути застосовано як для тригонометричного, так і для геометричного нівелювань у реальному часі спостережень;
- удосконалена методика виконання неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання дозволяє досягнути точності геометричного нівелювання II – го класу по лініях довжиною до 1 км із застосуванням одного тахеометра для виконання вимірювань;
- спосіб двостороннього геометричного нівелювання “вперед-назад” окрім підвищення точності нівелювання, дозволяє спростити вибір лінії нівелювання та виконувати нівелювання у одному напрямку без прокладання зворотного ходу, що суттєво скорочує час виконання робіт;
- обчислення еквівалентної висоти променя геометричного нівелювання за відлічуванням рейки дозволяє автоматизувати процес уведення поправок за вертикальну рефракцію в результати вимірювань на станції нівелювання;
- нівелір-рефрактометр геометричного типу можна застосувати для автоматизації процесу геометричного нівелювання, а також для визначення і прогнозу вертикальної рефракції за напрямом спостереження, що підвищує точність робіт;
- методика і розроблені алгоритми врахування рефракційного поля під час безперервних геодезичних моніторингових спостережень із використанням кореляційних взаємозв’язків спостережуваних напрямів дозволяє виключати його вплив на результати спостережень за деформацією споруд у реальному часі.

**Особистий внесок здобувача** полягає у виконанні теоретичних та експериментальних досліджень, опрацюванні отриманих результатів, формулюванні основних положень та висновків. Наукові результати, наведені у дисертаційній роботі, є результатом самостійних напрацювань автора. Результати напрацювань застосовані та досліджувались і пройшли практичну апробацію під час виконання робіт щодо створення геодезичної основи для будівництва Бескидського тунелю, моніторингових спостережень на Дністровській ГАЕС і Теремля-Ріцькій ГЕС, безперервних моніторингових спостережень на Дністровській і Канівській ГЕС за безпосередньою участю здобувача.

Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, у роботі використано лише ті поняття, розрахунки та положення, які становлять особистий внесок автора. Наукові положення і результати, що виносились на захист у кандидатській дисертації, не використовувались.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати наукових досліджень, що включені до дисертації, пройшли апробацію на:

- міжнародних науково-практичних конференціях “Геофорум” (м.Львів – Яворів - Брюховичі, 1997 - 2018);
- міжнародному науково-практичному форумі "Екологічні, технологічні та соціально-економічні аспекти ефективного використання матеріально-технічної бази АПК": Львів. держ. аграр. ун-т, 2008;
- міжнародних науково-практичних конференціях “Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні” (Ужгород, 2009, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018);
- міжнародних науково-технічних симпозіумах “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GNSS і GIS - технології” (Алушта, 2013, 2014 );
- IV міжнародній науковій конференції “Інформаційні геодезичні технології – застосування у сільськогосподарських зніманнях” (Полянчик, Польща, 2013);
- міжнародній науково-технічній конференції “Геоінформатика, геодезія, маркшейдерія” (Донецьк, 2013);
- міжнародних науково-технічних конференціях молодих вчених “GeoTerrace” (Львів, 2016 - 2017).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 48 друкованих працях, із них: 30 публікацій у наукових фахових виданнях, з яких 6 у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, що включені до наукометричних баз даних, і 24 публікації у наукових фахових виданнях України; 8 патентів України; 1 колективна монографія та 9 статей у матеріалах міжнародних наукових конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку літературних джерел (158 найменувань). Загальний обсяг дисертації становить 284 сторінки, ілюстрації складають 100 рисунків, 24 таблиці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, зазначено зв'язок роботи з науковими планами, з'ясовано стан дослідження проблеми, на розв'язання якої спрямовується науковий пошук, об'єкт і предмет дослідження, розкрито наукову новизну та положення, що виносяться на захист, практичне значення отриманих результатів, подано інформацію щодо апробації та публікації результатів дослідження.

У першому розділі “Аналіз методики і точності тригонометричного нівелювання” розглянуті теоретичні засади та похибки одностороннього тригонометричного нівелювання. Вказано, що тригонометричне нівелювання до кінця XIX століття було основним способом визначення висот опорних пунктів і широко застосовувалось для створення висотної основи топографічного знімання. Відомо, що найбільш важливі дослідження в цій галузі належать таким науковцям, як В. Я. Струве, Н. Я. Цингеру, І. І. Померанцеву та іншим.

Важливий внесок у підвищення точності нівелювання в приземному прошарку атмосфери внесли А. А. Ізотов, Л. П. Пеллінен, І. І. Ентін, К. В. Казанський, І. Г. Колчинський, А. Л. Островський, Д. І. Масліч, Б. Т. Тлустяк, Б. М. Джуман, Л. С. Хижак, П. В. Павлів, Ф. Д. Заблоцький, О. А. Мозжухін, А. В. Алексеев, І. І. Стацишин, В. О. Літинський, П. І. Баран, М. П. Марущак, О. І. Терещук, О. І. Мороз, Т. J. Kukkamaki, P. V. Angus-Leppan, E. K. Webb, E. Tengstrom, G. Teleki, G. Bahnert, Y. Moritz і багато інших науковців.

Відома строга формула одностороннього тригонометричного нівелювання:

$$h_{AB} = D_{AB} \frac{\cos\left(Z_{AB} - \frac{\psi}{2} + r - u_{AB}\right)}{\cos\left(\frac{\psi}{2}\right)} + i - v, \quad (1)$$

де  $h_{AB}$  - перевищення між точками А і В;  $D_{AB}$  - виміряна нахилена віддаль між приладом і візирною ціллю;  $Z_{AB}$  - виміряна приладом зенітна відстань до візирної цілі;  $\psi$  - кут між нормаллями, опущеними в точках спостереження та встановлення візирної цілі;  $r$  - кут вертикальної рефракції;  $u_{AB}$  - відхилення прямовисної лінії від нормалі;  $i$  та  $v$  - відповідні висоти приладу та візирної цілі над пунктами спостереження.

На основі детального аналізу цієї формули та впливу похибок вимірюваних величин на точність одностороннього тригонометричного нівелювання, беручи до уваги і інші важливі похибки, було виділено дві основні вагомості, які найбільше впливають на його точність. Це похибки вимірювання зенітних відстаней та визначення коефіцієнта вертикальної рефракції.

Похибки вимірювання зенітних відстаней, які викликані впливом динамічної і термічної турбулентності у приземній атмосфері, можуть досягати



суттєвих величин, що вказує на необхідність вибору періоду виконання спостережень із установленою атмосферою стратифікацією. Сучасне приладове забезпечення дозволяє вимірювати зенітні відстані із точністю 0.5" у лабораторних умовах. Вплив похибок вимірювання зенітних відстаней  $m_Z$  на точність вимірювання перевищення виражається формулою:

$$m_{h_z} = D \sin Z \cdot m_Z . \quad (2)$$

Величина похибки визначення перевищення зумовлена точністю вимірювання зенітних відстаней  $m_Z = 1''$  у виміряне перевищення може досягати 15 мм на горизонтальних трасах довжиною 3 км. Із проведених розрахунків точність вимірювання зенітних відстаней бажано було би досягти 0.2", що на сьогодні в умовах турбулентної атмосфери є доволі проблематичним завданням.

Більш суттєвою похибкою, яка на сучасному етапі також не піддається прогнозуванню та оперативному вимірюванню, є похибка визначення коефіцієнта вертикальної рефракції. Коефіцієнт вертикальної рефракції пов'язаний з кутом рефракції залежністю:  $k = r \frac{2R}{D_{AB} \sin Z_{AB}}$ , де  $R$  - радіус

кривини Землі по лінії спостереження. Коефіцієнт вертикальної рефракції залежно від умов спостереження і стратифікації атмосфери, може змінюватись у межах від -2 до +2 у екстремальних випадках і більше. Вплив похибок визначення коефіцієнта вертикальної рефракції  $m_k$  на точність вимірювання перевищення виражається формулою:

$$m_{h_k} = \frac{D^2 \sin^2 Z}{2R} m_k . \quad (3)$$

Величина похибки, зумовлена дією вертикальної рефракції у виміряне перевищення, може досягати величини до 1 м на горизонтальних трасах довжиною 3 км. Для суттєвого зменшення величин похибок визначення перевищення із одностороннього тригонометричного нівелювання, зумовлених впливом вертикальної рефракції, бажано обмежити його використання до 1 км. Це дасть змогу підвищити його точність на порядок. Сучасні методи визначення вертикальної рефракції дозволяють визначати коефіцієнт з точністю 0.3-0.5. Величину граничної точності визначення інтегрального коефіцієнта вертикальної рефракції бажано було б досягти 0.1. Така точність відповідає точності 8 мм для ліній довжиною 1 км і 3 мм для ліній – 0.6 км.

На основі проведеного аналізу запропоновано оцінку точності одностороннього тригонометричного нівелювання виконувати за спрощеною формулою:

$$m_{h_{AB}}^2 \approx D_{AB}^2 m_{Z_{AB}}^2 + \left( \frac{D_{AB}^2}{2R} \right)^2 m_{k_{AB}}^2 . \quad (4)$$

Аналіз одностороннього тригонометричного нівелювання (1) вказує на необхідність врахування відхилень прямовисних ліній для обчислення нормальних висот пунктів спостережень. Відомо, що за даними гравіметричних

спостережень складові прямовисних ліній можна обчислити, використовуючи формули, запропоновані В. Ф. Єремєєвим і Л. П. Пеллінею, з похибкою менше 0.1". Відхилення прямовисних ліній можна розрахувати за уточненою моделлю гравітаційного поля Землі EGM2008 шляхом інтерполяції даних на район спостережень. Гравіметричні спостереження є доволі вартісними і потребують спеціальних приладів для їх виконання, а застосування завжди супроводжуються похибками самої моделі та похибками інтерполяції.

З появою супутникових технологій з'явилась можливість визначати відхилення прямовисних ліній із використанням сумісних вимірювань перевищень GNSS спостереженнями та геометричним або тригонометричним нівелюванням. Сумісні GNSS вимірювання на пунктах тригонометричних спостережень дають можливість застосування строгої формули одностороннього тригонометричного нівелювання (1) шляхом розрахунку кута  $\psi$  між нормаллями, опущеними в точках спостереження та візирної цілі. Кут  $\psi$  можна розрахувати за геоцентричними координатами цих точок та параметрами застосованого референц-еліпсоїда:

$$\cos \psi = \frac{x_A x_B + y_A y_B + (z_A - z_{nA})(z_B - z_{nB})}{\sqrt{x_A^2 + y_A^2 + (z_A - z_{nA})^2} \cdot \sqrt{x_B^2 + y_B^2 + (z_B - z_{nB})^2}}, \quad (5)$$

де  $x_A, y_A, z_A$  та  $x_B, y_B, z_B$  - координати пунктів відповідно спостереження та візирної цілі (див. рис. 1);  $z_{nA}$  та  $z_{nB}$  - координати перетину нормаллями осі Z еліпсоїда, опущеними з точок А і В.

$$z_{nA} = -\frac{ae^2 \sin B_A}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_A}}, \quad (6)$$

де  $a$  - велика піввісь референц-еліпсоїда;  $e$  - перший ексцентриситет меридіанного еліпса;  $B_A$  - широта точки спостереження.

Розрахунок точності визначення перевищення із одностороннього тригонометричного нівелювання з застосуванням сучасних технологій і приладів відповідає сантиметровій величині на віддалі 1 км. Розраховано, що основним чинником, який впливає на точність визначення перевищення, є вплив зовнішніх умов, а саме - вертикальної рефракції.

Проведений аналіз основних методів визначення вертикальної рефракції.

Метеорологічний метод визначення коефіцієнта вертикальної рефракції поданий формулою Ізотова-Пеллінею:

$$k = 12.27 \frac{P}{T^2} + 503 \frac{P}{T^2} \frac{c}{h_e^b}, \quad (7)$$

де  $P$  - атмосферний тиск в гПа (мбар);  $T = (273.15 + t^\circ C)$  температура повітря в градусах Кельвіна ( $K^\circ$ );  $c$  - аномальний інтегральний градієнт температури, вимірний або приведений до висоти 1 м над поверхнею спостереження;  $h_e$  - еквівалентна висота променя над підстилаючою поверхнею;  $b$  - степінь, який залежить від стратифікації атмосфери ( $b = 2/3$  - для нестійкої стратифікації;  $b = 1$  - для байдужої;  $b = 4/3$  для стійкої стратифікації інверсії температури).

На сьогодні залишається проблема у визначенні основного чинника вертикальної рефракції аномального інтегрального градієнта температури. Це пов'язано з неоднорідністю атмосфери вздовж лінії спостереження. Неможливість виконання одночасних метеорологічних вимірювань по лінії візування унеможливорює застосування даного способу. Вимірювання градієнтів температури на кінцях лінії спостереження дає посередні результати. Так, за сприятливих умов, точкові вимірювання градієнтів температури повітря характеризуються точністю порядку  $m_c = 0.1 \text{ град/м}$ , відповідно точність визначення коефіцієнта вертикальної рефракції метеорологічними методами у залежності від еквівалентних висот складе  $m_k \approx 0.1 \div 0.3$ , а гранична точність визначення коефіцієнта вертикальної рефракції метеорологічними методами буде складати  $m_k^{\text{ран.}} \approx 0.3 \div 0.9$ . Це на порядок нижче бажаної точності.

Із геодезичних методів визначення вертикальної рефракції розглянуто спосіб спостереження еталонного напрямку та спосіб визначення вертикальної рефракції за коливаннями зображень.

Визначення коефіцієнта вертикальної рефракції за спостереженням еталонного напрямку, по якому перевищення  $h_{AB}^{em}$  визначене із високоточного нівелювання, наведено модернізованою нами формулою:

$$k_{em.} = \left( D_{AB} \cos Z_{AB} + \frac{D_{AB}^2 \sin^2 Z_{AB}}{2R} + i - v - h_{AB}^{em} \right) \frac{2R}{D_{AB}^2 \sin^2 Z_{AB}}. \quad (8)$$

Запропоновано розрахунок точності визначення інтегрального коефіцієнта вертикальної рефракції за спостереженням базисної лінії виконувати за спрощеною формулою:  $m_{k_{em.}} \approx \frac{18}{L_{км}^2} m_h^{sum.}$ , де  $L = D \sin Z$ . Так для

спостережуваного базису  $L_{км} = 1 \text{ км}$  та точності вимірювань перевищень (без рефракції)  $m_h^{sum.} \approx 0.005 \cdot L_{км} m_Z \approx 0.005 \text{ м}$ , точність визначення інтегрального коефіцієнта вертикальної рефракції складе  $m_k = 0.1$ , а гранична точність – 0.3.

Розглядаючи спосіб визначення вертикальної рефракції за коливаннями зображень  $\sigma$ , були розраховані та уточнені коефіцієнти у формулах для обчислення коефіцієнтів вертикальної рефракції для різних стратифікацій атмосфери:

$$k_{(\text{нестійка})} = k_n - 7.17 D^{-1/2} h_e^{-2/3} \sigma_\alpha'', \quad (9)$$

$$k_{(\text{байдужа})} = k_n \mp 8.35 D^{-1/2} h_e^{-2/3} \sigma_\alpha'', \quad (10)$$

$$k_{(\text{стійка})} = k_n + 13.3 D^{-1/2} h_e^{-2/3} \sigma_\alpha'', \quad (11)$$

де  $k_n = 12.27 \frac{P}{T^2} \approx 0.16$  - коефіцієнт нормальної складової вертикальної рефракції.

Флуктуації кутів приходу зображення  $\sigma$  у вертикальній площині можна замінити коливаннями зенітних відстаней  $m_Z$ . Точність визначення коефіцієнта

вертикальної рефракції за коливаннями зображень залежить від точності вимірювання самих флуктуацій і від віддалі. Для розрахунку точності визначення коефіцієнта вертикальної рефракції за флуктуаціями зенітних відстаней запропоновано формулу:

$$m_{k\sigma} = \frac{5m_z}{\sqrt{Dh_e(n-1)}}, \quad (12)$$

де  $n$  - кількість прийомів спостереження зенітних відстаней.

Розрахунки с.к.п. визначення коефіцієнта вертикальної рефракції за коливаннями зображень для віддалі  $D=1000\text{м}$ , величині коливань  $\sigma=2''$  із  $n=6$  прийомів дорівнюють  $m_{k\sigma}=0.05$ . Гранична похибка визначення коефіцієнта рефракції відповідає величині  $\text{гран.}m_k=3m_{k\sigma}=0.15$ . Точність визначення коефіцієнта можна підвищити збільшенням кількості прийомів вимірювань та виконанням спостережень у періоди слабких коливань зображень.

У другому розділі “**Розрахунок і обґрунтування підвищення точності способів тригонометричного нівелювання**” розглянуто теоретичні засади способів тригонометричного нівелювання, які ґрунтуються на подвійних вимірюваннях перевищень із частковою компенсацією вертикальної рефракції, отриманої за різницею напрямів спостереження. Розглянуто способи двостороннього, дистанційного (із середини) та тригонометричного нівелювання через точку.

Основна проблема визначення часткових коефіцієнтів вертикальної рефракції із двосторонніх спостережень полягає у визначенні коефіцієнта рефракційного співвідношення аномальних частин вертикальних рефракції

напрямів спостереження  $q = \frac{k_{ан AB}}{k_{ан BA}}$ . За визначенням цього коефіцієнта

запропоновано обчислювати перевищення із двостороннього тригонометричного нівелювання за формулою:

$$h_{AB}^{дв.пр.} = \frac{h_{AB}^{opr.} - h_{BA}^{opr.}}{2} - \left( \frac{q-1}{q+1} \right) \left( \frac{h_{AB}^{opr.} + h_{BA}^{opr.}}{2} \right), \quad (13)$$

де  $h_{AB}^{opr.}$  і  $h_{BA}^{opr.}$  - пряме і зворотне перевищення, які обчислені із урахуванням нормальної складової вертикальної рефракції:

$$\left. \begin{aligned} h_{AB}^{opr.} &= D_{AB} \cos Z_{AB} + \frac{D_{AB}^2 \sin^2 Z_{AB}}{2R} - k_{н AB} \frac{D_{AB}^2 \sin^2 Z_{AB}}{2R} + i_A - v_B \\ h_{BA}^{opr.} &= D_{BA} \cos Z_{BA} + \frac{D_{BA}^2 \sin^2 Z_{BA}}{2R} - k_{н BA} \frac{D_{BA}^2 \sin^2 Z_{BA}}{2R} + i_B - v_A \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

Оцінку точності двостороннього тригонометричного нівелювання запропоновано виконувати за спрощеною формулою:

$$m_{h_{\text{об.тр.нів.}}}^2 \cong \left( \frac{\bar{D}}{\sqrt{2}\rho''} \right)^2 m_Z^2 + \left( \frac{\bar{D}^2}{4R} \right)^2 m_{(k_{AB}-k_{BA})}^2, \quad (15)$$

де  $m_{(k_{AB}-k_{BA})}$  - с.к.п. визначення різниці коефіцієнтів вертикальної рефракції по відповідній лінії спостереження.

Аналіз численних експериментальних даних визначених коефіцієнтів вертикальних рефракцій на різних об'єктах дозволяє констатувати, що різниці коефіцієнтів вертикальних рефракцій між спостережуваними напрямками у періоди встановленої нестійкої стратифікації (з 9<sup>h</sup> до 17<sup>h</sup>) на порядок менші за величини самих значень коефіцієнтів і не перевищують  $k_{AB} - k_{BA} \leq 0.1$ . Тобто, неврахування різниці коефіцієнтів вертикальної рефракції із двосторонніх одночасних спостережень не перевищить  $m_{(k_{AB}-k_{BA})} \leq 0.1$  за умови встановлення однотипності атмосферної стратифікації по лінії спостереження.

Зменшення похибки визначення  $m_{(k_{AB}-k_{BA})}$  можна отримати обчисливши часткові значення рефракцій, використовуючи сумарний кут вертикальної рефракції, який визначений із двосторонніх спостережень та коефіцієнт рефракційного співвідношення.

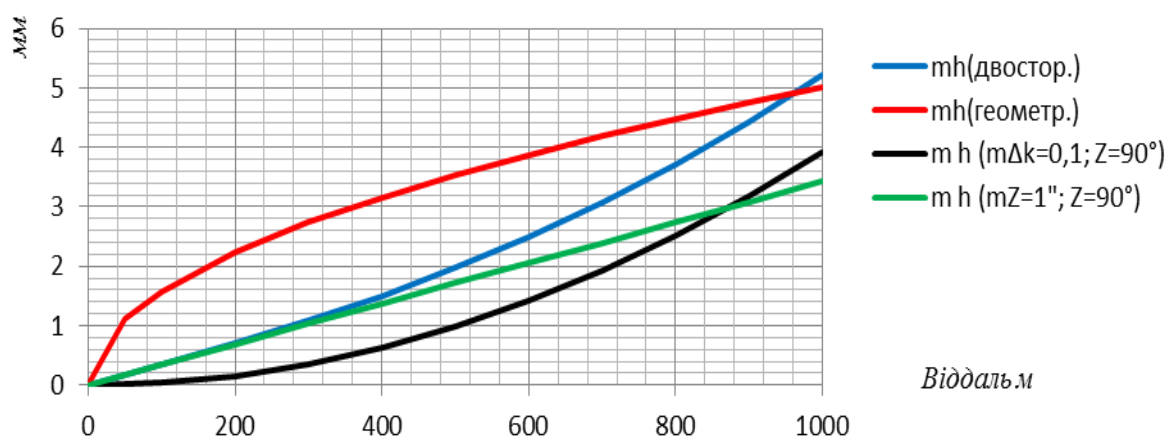


Рис. 1. Графічне порівняння с.к.п. визначення перевищення із геометричного II класу та двостороннього тригонометричного нівелювання у залежності від віддалі (до 1 км) та точності вимірювання зенітних відстаней  $m_z = 1''$  і визначення різниці коефіцієнтів вертикальної рефракції  $m_{(k_{AB}-k_{BA})} = 0.1$

Проведений теоретичний аналіз вказує на можливість застосування двостороннього тригонометричного нівелювання на трасах до 1 км, де приладові похибки співрозмірні з похибками визначення вертикальної рефракції за точністю, яка задовольняє точність геометричного нівелювання II класу  $m_{h_{\text{геом.}}} = 5 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}}$ . Теоретичні розрахунки точності визначення перевищення із двостороннього тригонометричного нівелювання, зумовленої похибкою визначення різниці взаємозворотних коефіцієнтів вертикальної рефракції  $m_{(k_{AB}-k_{BA})} = 0.1$  не перевершують вплив похибки вимірювання

зенітних відстаней  $m_z = 1''$  до віддалі 0.9 км, а сумарна похибка визначення перевищення з такими ж вимірюваннями відповідає точності геометричного нівелювання II класу до 1 км (див.рис.1). Прокладання висотних ходів двостороннім тригонометричним нівелюванням із подвійним запасом точності рекомендується виконувати зв'язковими лініями спостереження довжиною до 600 м.

Вимірявши перевищення за напрямками  $A$  і  $B$  з однієї станції спостереження  $C$ , можна посередньо визначити перевищення між точками спостереження  $A$  і  $B$ . Такий спосіб названо дистанційним.

$$h_{AB}^{дист.} = h_{CB}^{вим.} - h_{CA}^{вим.} - k_{CB} \frac{D_{CB}^2 \sin^2 Z_{CB}}{2R} + k_{CA} \frac{D_{CA}^2 \sin^2 Z_{CA}}{2R} + u_{CB}'' \frac{D_{CB} \sin Z_{CB}}{\rho''} - u_{CA}'' \frac{D_{CA} \sin Z_{CA}}{\rho''} \quad (16)$$

Застосування вимірювань перевищень між точками значно покращує результати визначення перевищення через використання різниць поправок за вертикальну рефракцію (16).

За умови рівності сторін та фіксованих значень зенітних віддалей  $Z_{CA} = Z_{CB} = 90^\circ$  без врахування відхилення важка залежність (16) перетворюється у формулу геометричного нівелювання із середини:

$$h_{AB}^{дист.} = v_A - v_B + \frac{(k_{CA} - k_{CB})d^2}{2R}, \quad (17)$$

де  $d = d_{CA} = d_{CB} = D_{CA} \sin Z_{CA}$  - горизонтальні проєкції пліч нівелювання.

Перевага дистанційного способу вимірювання перевищення між точками полягає у одночасності спостережень перевищень, де умовно можна прийняти рівність коефіцієнтів рефракцій різних напрямів. Так, за умови невеликого горизонтального кута та перевищення між точками і рівності поверхонь, над якими виконують спостереження, -  $k_{CA} \cong k_{CB}$ . Також за цієї умови можна вилучити вплив відхилення прямовисних ліній, так як,  $u_{CB}'' \cong u_{CA}''$ .

Однак, дистанційний спосіб, порівняно з двостороннім тригонометричним нівелюванням, є безконтрольним. Для отримання надійних результатів вимірювання бажано виконувати двічі із різних точок спостереження.

Для зменшення впливу вертикальної рефракції через зменшення віддалі між пунктами спостереження застосовують спосіб нівелювання через додаткову точку  $C$ . Перевищення між пунктами  $A$  і  $B$  визначають, як різницю перевищень по напрямках спостереження на додаткову точку, висоту якої не змінюють і можна не вимірювати:

$$h_{AB}^{через.т.} = h_{AC}^{вим.} - h_{BC}^{вим.} - k_{AC} \frac{D_{AC}^2 \sin^2 Z_{AC}}{2R} + k_{BC} \frac{D_{BC}^2 \sin^2 Z_{BC}}{2R} + u_{AC}'' \frac{D_{AC} \sin Z_{AC}}{\rho''} - u_{BC}'' \frac{D_{BC} \sin Z_{BC}}{\rho''} \quad (18)$$

Цей спосіб також покращує результати визначення перевищення через використання різниць поправок вертикальних рефракцій, але ускладнюється досягнення одночасності спостережень та рівності коефіцієнтів рефракцій на окремих пунктах. Спосіб нівелювання через точку є безконтрольним.

Комбінація способів тригонометричного нівелювання (двостороннього, дистанційного нівелювання між точками та нівелювання через додаткову точку), залежно від умов спостережень надає можливість прискорення і підвищення точності виконання нівелювання.

У листопаді 2016 року, в рамках теми “Дністровська ГАЕС. Визначення горизонтальних переміщень пунктів опорної геодезичної мережі методом GPS спостережень в 2016 р.” держ. реєстр. № 0117U0007363, у присутності представника замовника було виконано апробацію передачі висот на пункти водовипуску від фундаментального репера Rp 10 шляхом прокладання висотних ходів із застосуванням неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання та врахуванням вертикальної рефракції.

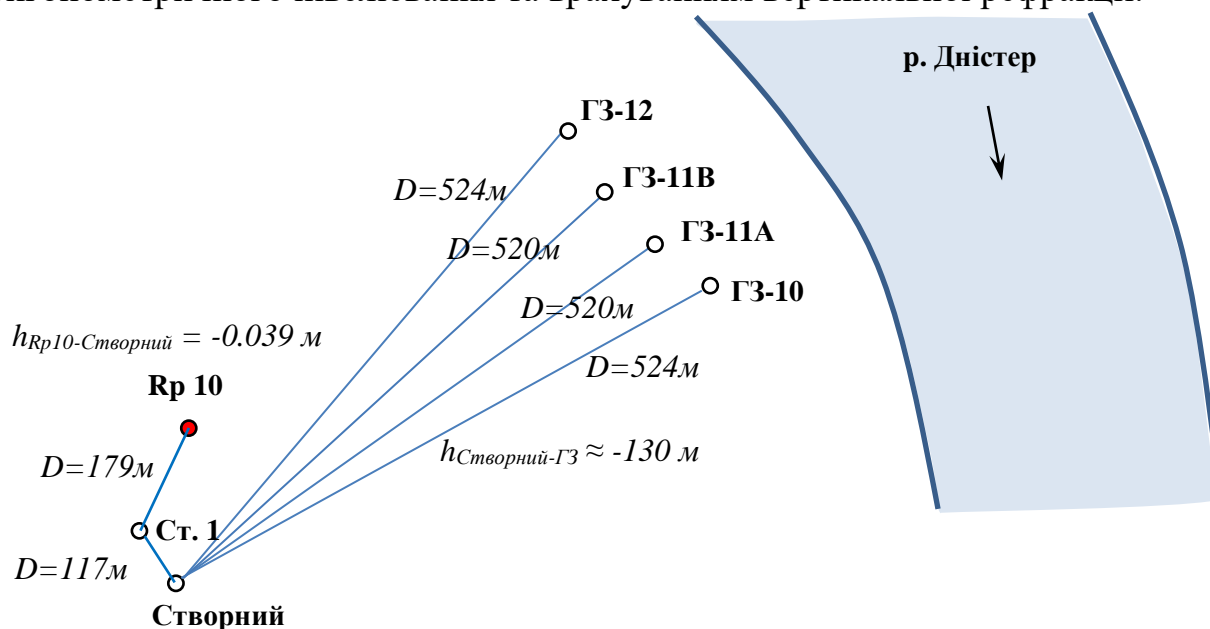


Рис. 2. Схема контрольної передачі висот неодночасним двостороннім тригонометричним нівелюванням на Дністровській ГАЕС

Лінійно-кутові вимірювання виконували на побудованій просторовій мережі (див. рис. 2).

Наземні лінійні спостереження виконані електронним роботизованим тахеометром (Total Station Positioning System TSPS) TCRP-1201 фірми Leica. С.к.п. вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів одним прийомом – 1", а вимірювання ліній  $\pm(1 + 1.5 \cdot ppm)$  мм. Вимірювання електронним тахеометром проведені в прямому і зворотному напрямі. Вимірювання кутів і ліній виконано 10 прийомами при двох положеннях вертикального круга із включеною функцією АТР – автоматичного наведення на ціль за максимумом відбитого сигналу.

Для висотної прив'язки п. Створний прокладено подвійний хід тригонометричного нівелювання від фундаментального репера Rp 10. Хід складався із двох ліній і однієї перехідної точки Ст. 1.

Для прив'язки та визначення контрольних перевищень на пунктах водовипуску ГЗ-10, ГЗ-11А, ГЗ-11В, ГЗ-12 прокладений контрольний нівелірний хід від фундаментального репера (200 м) високоточним цифровим нівеліром фірми Leica DNA 03 із сертифікованими 3-х метровими інварними рейками.

У результаті виконаних спостережень проведено аналіз отриманих умовних висот із тригонометричного та геометричного нівелювання, результати якого наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Висоти реперів на водовипуску та порівняння точності визначення висот  
неодночасним двостороннім тригонометричним і геометричним  
нівелюваннями**

Назва пункту	ВИСОТИ (м)		Різниця висот тр.-геом. (мм)
	із геометричного нівелювання (м)	із двостороннього тригонометричного нівелювання (м)	
ГЗ -10	91.8191	91.8240	5.1
ГЗ -11А	91.9509	91.9533	2.4
ГЗ -11В	91.9342	91.9388	4.6
ГЗ -12	91.8030	91.8073	4.3

Середнє значення **4.1**

с.к.п. **1.2**

Середнє значення та величина середньої квадратичної похибки визначення перевищення вказують на підтверджену заміну геометричного нівелювання II класу прецизійним тригонометричним нівелюванням. Для прокладання геометричного нівелювання I класу довжина ходу дорівнює 4 км по дорозі із крутими схилами, а це відповідає точності  $m_{h \text{ I класу}} = 3 \text{ мм} \sqrt{L_{\text{км}}} = 3 \text{ мм} \sqrt{4_{\text{км}}} = 6 \text{ мм}$ .

Для прокладання нівелірних ходів тригонометричним нівелюванням, а також для використання тригонометричного нівелювання у полігонометричних ходах, нами розроблено та апробовано способи виключення похибок вимірювання висот приладу та візирних цілей. Для апробації можливості застосування неодногочасного двостороннього тригонометричного нівелювання та прокладання висотних ходів із застосуванням електронного тахеометра на полігоні Шацького національного парку у 2017 р. було виміряно 2 ходи висотного полігону. Так, на початковій та кінцевій точках висотного ходу під час тригонометричного нівелювання встановлювали одну і ту ж саму візирну ціль. Для виконання тригонометричних вимірювань тахеометром TCRP-1201 у висотних ходах застосували триштативну систему без зміни висот підставок в



процесі передачі висот на зв'язкові точки. Оскільки висоти штативів та підставок не змінювались у процесі вимірювань, то в даних ходах вони взагалі не вимірювались. Прилад та відбивачі на адаптерах мали рівні висоти і мінялись місцями встановлення. Таким чином, похибки з вимірювання висот приладу та візирних цілей були виключені повністю. Довжини сторін у ходах не перевищували 640 м.

Таблиця 2

**Порівняння результатів геометричного III класу та одночасного двостороннього тригонометричного нівелювання**

Назва ходу	Довжина ходу (км)	Нівелювання		Різниця перевищень $\Delta h$ (мм)
		Геометричне $\Sigma h$ (м)	Одночасне тригонометричне $\Sigma h$ (м)	
ЛЕП - Пілон	3.6	1.080	1.079	1
Пошта - Свердловина	3.2	-8.410	-8.412	2

У таблиці 2 наведено перевищення по ходах, отриманих із геометричного нівелювання III класу цифровим нівеліром Dini 22, та перевищення, що отримані із двостороннього одночасного тригонометричного нівелювання. Різниця  $\Delta h$  отримані між перевищеннями із геометричного нівелювання та тригонометричного двостороннього одночасного нівелювання. У ході ЛЕП-Пілон  $\Delta h=1$ мм, а в ході Пошта-Свердловина –  $\Delta h=2$ мм.

Під час виконання геометричного нівелювання по лінії Рр ЛЕП – Рр Пілон отримали висотну нев'язку між прямим та зворотним ходом 3 мм, а у ході Рр Пошта – Рр Свердловина – 6.5 мм. Згідно з інструкцією із геометричного нівелювання, допустима нев'язка для даних ходів дорівнює 19 мм та 18 мм відповідно. Різниця між визначеними перевищеннями з геометричного та тригонометричного нівелювання значно менші від допустимих значень.

Переваги даного методу є і в часі виконання робіт. Так, на виконання геометричного нівелювання III класу для ходу довжиною 3.5 км витрачається приблизно 6 годин, а на виконання двостороннього тригонометричного нівелювання було витрачено 4 години. Для виключення похибок вимірювань висот візирних цілей та тахеометра було запропоновано видозмінений спосіб двостороннього тригонометричного нівелювання із використанням вимірювань способом дистанційного нівелювання між точками (короткими і довгими плічми). У запропонованому способі висоти тахеометра не вимірюють. Висоти візирних цілей підбирають рівними або вводять поправку за їх різницю (див.рис.3).

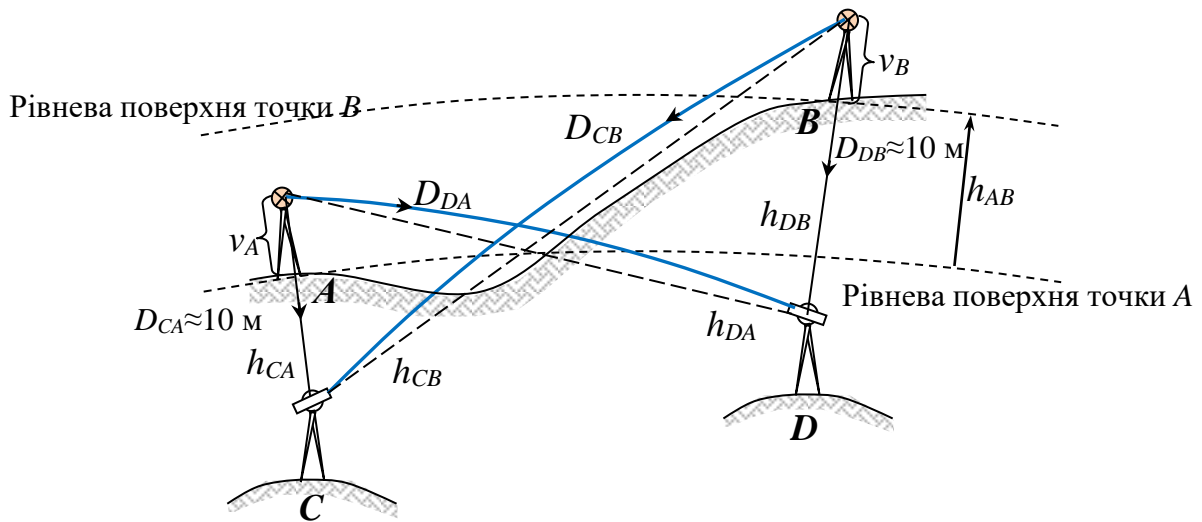


Рис. 3. Схема двостороннього тригонометричного нівелювання дистанційним способом (нівелювання між точками)

Середнє значення перевищення  $\bar{h}_{AB}$  отримуємо за формулою:

$$\bar{h}_{AB} = \frac{h_{CB}^{sum.} - h_{CA}^{sum.} + h_{DB}^{sum.} - h_{DA}^{sum.}}{2} - \left( k_{CB} \frac{D_{CB}^2 \sin^2 Z_{CB}}{4R} - k_{DA} \frac{D_{DA}^2 \sin^2 Z_{DA}}{4R} \right). \quad (19)$$

За умови прийняття рівності коефіцієнтів вертикальної рефракції  $k_{CB} = k_{DA}$  та рівності довгих пліч, можна у формулі (19) обмежитись першим членом. Оцінка точності запропонованого способу тригонометричного нівелювання розраховують за формулою:

$$m_h^{двост.} = \sqrt{\frac{\bar{D}_{CB}^2}{2\rho^2} m_z^2 + \frac{\bar{D}_{CB}^4}{16R^2} m_{\Delta k}^2}. \quad (20)$$

Спосіб пройшов апробування на експериментальному полігоні у м. Львові. Загальна довжина тригонометричного ходу, який прокладено від репера I класу № 555 до репера II класу № 383 по полігонометричному ході, дорівнювала 3.97 км. Висоти пунктів були визначені за програмою геометричного нівелювання III класу цифровим нівеліром DiNi 22.

Експериментальне двостороннє тригонометричне нівелювання виконували електронними тахеометрами Sokkia SET 610 з технічними характеристиками  $m_D = 2\text{мм} + 2\text{ppm} \cdot D$  і  $m_\beta = m_z = 6''$ . Одночасні двосторонні кутові і лінійні вимірювання виконували програмами у три прийоми на двох положеннях вертикального круга двома тахеометрами. Для виконання тригонометричного нівелювання таким способом застосували однаково високі відбивачі.

Середнє значення різниць перевищень між результатами тригонометричного і геометричного нівелювань за секціями ходу склало 0.04 мм, а с.к.п дорівнює 1.45 мм. Висотна нев'язка ходу тригонометричного нівелювання склала -11.3 мм, при допустимій 19.8 мм.

У 2018 році було прокладено експериментальний хід двостороннього неодночасного тригонометричного нівелювання способом нівелювання між точками на полігоні Рівненської атомної електростанції (РАЕС). Одночасно із прокладанням висотного тригонометричного ходу тахеометром TCRP-1201 між Рр 13 і Рр 11 незалежною бригадою працівників геодезичного відділу РАЕС виконано геометричне нівелювання II класу між цими реперами шляхом прокладання подвійного ходу високоточним нівеліром Ni 002 з комплектом інварних рейок.

Хід характеризувався зтяжним схилом. Довжина ходу дорівнювала 1045 м. Загальна кількість нівелірних станцій геометричного нівелювання – 34. Середнє перевищення ходу (прямо – 24.74698 м, зворотно - - 24.74856 м), за виконаним геометричним нівелюванням, дорівнює – 24.74777 м.

Хід двостороннього тригонометричного нівелювання складався із 6 станцій. Спостереження виконувались роботизованим тахеометром TCRP-1201 фірми Leica способом кругових прийомів (5 прийомів із зміною положення круга між півприйомами). Візування виконували на візирні цілі висотою 1.30 м.

Різниця суми виправлених перевищень за вертикальну рефракцію (24.7476 м) і середнім перевищенням із геометричного нівелювання (24.74777 м) склала величину – 0.1 мм. Точність нівелювання II класу для нівелірного ходу довжиною 1.045 км складає -  $5\text{мм}\sqrt{L_{\text{км}}} \approx 5\text{мм}$ .

Подану методику тригонометричного нівелювання можна застосовувати і під час сумісного прокладання полігонометричних і висотних ходів. У 2018 році на Бережанському науковому полігоні було прокладено експериментальний полігонометричний хід із використанням роботизованого тахеометра TCRP-1201. Станції ходу були вибрані у найбільш сприятливих для спостереження місцях. Тахеометр на станціях не центрували і не вимірювали його висоту. Спостереження виконували на геодезичні тички, які утримували біподами (спеціальними тримачами) над центрами полігонометричних знаків. Висоти візирних цілей, як і в попередньому експерименті, дорівнювали 1.30 м. Під час виконання 10 прийомів вимірювань роботизованим тахеометром фіксувались метеорологічні параметри приземної атмосфери – тиск і температура повітря для введення поправок у виміряні довжини ліній та розрахунку коефіцієнта нормальної вертикальної рефракції. “Вільний” полігонометричний хід був прокладений між пунктами полігонометрії X та XIX, координати яких визначені із GNSS - спостережень у статичному режимі спостережень. Висоти пунктів полігонометрії були отримані раніше із геометричного нівелювання II класу. Для передачі висот у полігонометричному ході було застосоване неодночасне двостороннє тригонометричне нівелювання, де перевищення визначали дистанційним способом. Введення поправок, зумовлених вертикальною рефракцією, обчислювали, використавши відповідні флуктуації зенітних відстаней. Довжина ходу склала 1.8 км, який був поміряний із 8 станцій установки тахеометра.

У результаті опрацювання даних вимірювань та врівноваження полігонометричного ходу отримана планово висотна оцінка точності положення пунктів полігонометричного ходу, яка наведена в табл. 3.

Таблиця 3

**Оцінка точності врівноваження планово висотного положення пунктів полігонометричного ходу від п.п. X до п.п. XIX м. Бережани, 2018р.**

№№ п.п.	$M_{XY}$ (мм)	$M_X$ (мм)	$M_Y$ (мм)	$M_H$ (мм)
X				
12	2.7	1.8	2.0	1.3
22	3.2	2.1	2.4	1.3
5440	3.3	2.2	2.6	1.3
6169	3.1	1.9	2.4	1.4
2515	2.4	1.5	1.9	1.3
XIX				

Планова  $M_{XY}$  та висотна  $M_H$  точність положення пунктів полігонометрії повністю задовольняє точність полігонометрії 4 класу.

Для визначення нормальних висот у висотних ходах тригонометричного нівелювання залишається відкритим питання врахування відхилення прямовисних ліній за азимутальними напрямками спостережень. З розвитком GNSS - технологій визначення координат точок спостережень та вимірів перевищень геометричним чи тригонометричним нівелюванням можна обчислити відхилення прямовисних ліній по лінії заданого азимута спостереження залежно від прийнятого референц-еліпсоїда.

Відхилення прямовисних ліній можна визначити і за різницею зенітних відстаней:

$$u_{AB} = Z_{AB}^{GPS} - Z_{AB}^{\Gamma}, \quad (21)$$

де  $Z_{AB}^{GPS}$  - зенітна відстань, обчислена за даними GNSS - спостережень;  $Z_{AB}^{\Gamma}$  - зенітна відстань, обчислена за геодезичними наземними спостереженнями.

Для одностороннього тригонометричного нівелювання напишемо:

$$\cos Z_{AB}^{\Gamma} = \frac{h_{AB}^{гум.}}{D_{AB}} + k_{AB} \frac{D_{AB} \sin^2 Z_{AB}}{2R}. \quad (22)$$

Для визначення  $Z_{AB}^{GPS}$  і  $Z_{BA}^{GPS}$  можна записати рівняння нормалей, які опущені в точки спостереження. Оскільки координати точок спостереження отримані із GNSS вимірювань, то координати точок перетину із віссю Z отримують  $x_{nA} = y_{nA} = 0$ ,  $z_{nA}$  - за формулою (6).

Зенітну відстань  $Z_{AB}^{GPS}$  знайдем за перетином двох векторів, використовуючи геоцентричні координати пунктів:

$$\cos Z_{AB}^{GPS} = \frac{x_A(x_B - x_A) + y_A(y_B - y_A) + (z_A - z_{nA})(z_B - z_A)}{\sqrt{x_A^2 + y_A^2 + (z_A - z_{nA})^2} \cdot \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}} . \quad (23)$$

Апробацію теоретичних викладок визначення відхилень прямовисних ліній було проведено у 2018 році за результатами неодночасного тригонометричного нівелювання та GNSS - спостережень на опорній мережі Дністровської ГАЕС. За неодночасним двостороннім тригонометричним нівелюванням по відповідних напрямках були обчислені перевищення із урахуванням вертикальної рефракції. Тригонометричне нівелювання виконували роботизованим тахеометром TCRP-1201 10-ма прийомами із перестановкою круга між півприйомами та автоматизованим наведенням на максимум відбитого сигналу. Супутникові спостереження виконували в статичному режимі двочастотними приймачами сесіями по 6 годин із зміною антен та приймачів сигналів (загальна кількість годин спостережень на пункті становила 18 год.). Опрацювання результатів GNSS спостережень виконано в програмному середовищі LEICA Geo Office Combined для обчислення координат у системі УСК 2000. Геодезичні висоти пунктів отримані з використанням параметрів референц-еліпсоїду Красовського.

Опрацювання результатів визначених відхилень прямовисних ліній із застосуванням способу найменших квадратів дало можливість отримати складові відхилення на опорній мережі Дністровської ГАЕС -  $\xi = 0.79''$  та  $\eta = 3.06''$ . Середня квадратична похибка відхилень прямовисних ліній за даними спостережень -  $m_u = 2.20''$ .

У третьому розділі “**Підвищення точності способів геометричного нівелювання**” розглянуто теоретичні засади способів геометричного нівелювання. Показано, що геометричне нівелювання є частковим випадком тригонометричного нівелювання за умови встановлення променя візування за зенітною відстанню рівною  $Z = 90^\circ$ , що відповідає горизонтальному положенню променя візування. Для виконання геометричного нівелювання, порівнюючи із тригонометричним нівелюванням, в основному, застосовується дистанційний спосіб визначення перевищення (нівелювання із середини) із дотриманням умови рівності пліч. Обґрунтовані основні похибки геометричного нівелювання “із середини”. Показано, що основними недоліками даного способу є неконтрольованість стабільності встановлення візирного променя в горизонтальне положення та неврахування вертикальної рефракції у виміряні перевищення.

Запропонований нами спосіб двостороннього геометричного нівелювання “вперед-назад” (рис.4) передбачає подвійні вимірювання перевищень способом “вперед” з кінців лінії нівелювання (прямо і зворотно). За аналогією із двостороннім тригонометричним нівелюванням способом нівелювання між точками (19), середнє перевищення обчислюють із двостороннього геометричного нівелювання за спрощеною формулою:

$$h_{AC}^{cep.} = \frac{h_{AC} - h_{CA}}{2} \cong \frac{a'_A - b'_C - a'_A + b'_A}{2} - (k_{1C} - k_{2A}) \frac{d_{1C}^2}{4R}, \quad (24)$$

де  $a'_A, b'_C$  – відлічування рейок з першої станції встановлення нівеліра, відповідно ближньої та дальньої рейки, які встановлені у точках А і С;  $b'_A, a'_C$  – відлічування рейок з другої станції встановлення нівеліра, відповідно дальньої та ближньої рейки, які встановлені у точках А і С;  $d_{1C} \cong d_{2A} = d$  – горизонтальні віддалі між нівеліром і дальніми рейками;  $k_{1C}, k_{2A}$  – коефіцієнти вертикальної рефракції відповідно вздовж ліній  $d_{1B}$  і  $d_{2A}$  відповідно на станції 1 та 2.

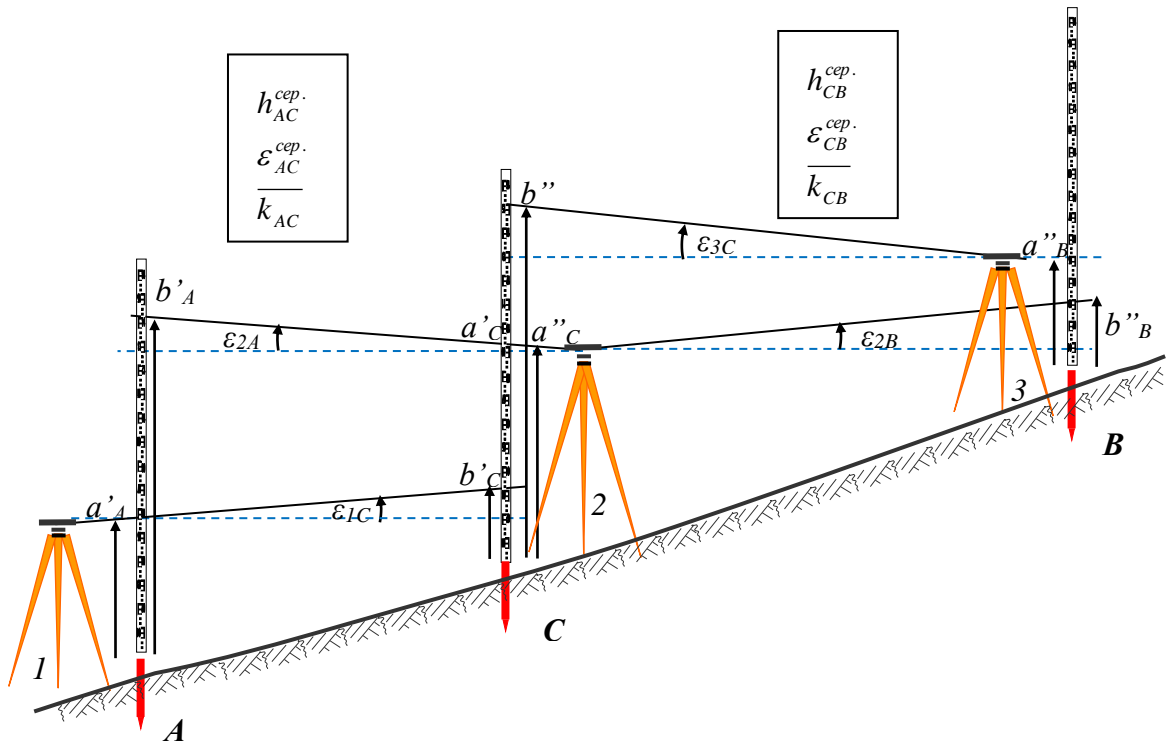


Рис.4. Спосіб двостороннього геометричного нівелювання “вперед – назад”

Ми отримали формули для визначення перевищення, коефіцієнта середньої інтегральної вертикальної рефракції  $\bar{k}$  та контролю сумарного кута відхилення променя візування від горизонтальності  $\sum(\bar{i}'' - \bar{r}'')$  для двостороннього тригонометричного нівелювання з врахуванням різниць пліч:

$$h_{AC} = \frac{(a'_A - b'_C) - (a'_C - b'_A)}{2} - \frac{(d_{1A}^2 - d_{1C}^2) - (d_{2C}^2 - d_{2A}^2)}{4R} + \frac{(d_{1A}^2 - d_{1C}^2)k_1 - (d_{2C}^2 - d_{2A}^2)k_2}{4R} - \frac{i''}{2\rho''} \left( (d_{1A} - d_{1C}) - (d_{2C} - d_{2A}) \right); \quad (25)$$

$$\bar{k} = 1 - \frac{2R \left( (a'_A - b'_C) + (a'_C - b'_A) \right) \cdot \rho'' - \left( (d_{1A} - d_{1C}) + (d_{2C} - d_{2A}) \right) \cdot i''}{\rho'' \left( (d_{1A}^2 - d_{1C}^2) + (d_{2C}^2 - d_{2A}^2) \right)}; \quad (26)$$

$$\sum(\bar{i}'' - \bar{r}'') = \frac{\rho'' \left( (a'_A - b'_C) + (a'_C - b'_A) \right) \cdot 2R - \left( (d_{1A}^2 - d_{1C}^2) + (d_{2C}^2 - d_{2A}^2) \right)}{2R \left( (d_{1A} - d_{1C}) + (d_{2C} - d_{2A}) \right)}; \quad (27)$$

де  $\bar{i}''$  - кут негоризонтальності променя візування.

Середнє значення кута негоризонтальності променя візування нівеліра  $\bar{i}''$  визначають у лабораторних умовах за виключенням вертикальної рефракції або в періоді спокійних зображень, коли  $k_n \approx 0.14 - 0.16$ .

Формули (25-27) надають можливість автоматизації способу нівелювання “вперед-назад” шляхом програмування їх у пам’яті цифрового нівеліра для обчислення перевищення та контролю спостережень за сумарним кутом

$$\varepsilon'' = \frac{\psi''}{2} + \bar{i}'' - r'', \text{ а також визначення інтегрального коефіцієнта вертикальної}$$

рефракції за умови визначеного у лабораторних умовах кута  $\bar{i}''$  та введеного у пам’ять нівеліра. Це є можливим із застосуванням сучасних цифрових нівелірів, які крім автоматизованого відлічування положення горизонтального променя візування на шкалі рейки, визначають і віддаль до неї та ще обладнані достатньо потужними портативними комп’ютерами.

Так, як і в класичному нівелюванні “із середини”, для контролю просідання костилів і нівеліра, нівелювання способом двостороннього геометричного нівелювання “вперед-назад” пропонується виконувати по двох парах костилів в одному напрямі.

Підвищення точності двостороннього геометричного нівелювання можна досягнути, збільшивши точність врахування вертикальної рефракції. За аналогією до двостороннього тригонометричного нівелювання (13) запропоновано:

$$h_{AC}^{дв.геом.} = \frac{h_{AC}^{вим.} - h_{CA}^{вим.}}{2} - \left( \frac{q-1}{q+1} \right) \left( \frac{h_{AC}^{вим.} + h_{CA}^{вим.}}{2} \right), \quad (28)$$

де  $q = \frac{m_{h_{AC}}}{m_{h_{CA}}} \approx \frac{h_{e_{CA}}}{h_{e_{AC}}}$  коефіцієнт рефракційного співвідношення, який

розраховують за співвідношеннями флуктуаціями виміряних перевищень прямого  $m_{h_{AC}}$  і зворотного  $m_{h_{CA}}$  напрямків або за еквівалентними висотами променя візування. Задавши кількість прийомів відлічування рейки, у цифрових нівелірах можна отримати с.к.п. відлічування і за ним розрахувати с.к.п. осередненого перевищення. Коефіцієнт рефракційного співвідношення можна визначити і за еквівалентними висотами зворотного напрямку до прямого. Еквівалентні висоти пропонується розраховувати за відлічуванням шкал рейок за виведеною формулою (29) із точністю шорсткості рельєфу:

$$h_{e_{AC}} = \frac{2a'_A + b'_C}{3}, \quad h_{e_{CA}} = \frac{2a'_C + b'_A}{3}. \quad (29)$$

Це підвищення точності вимагає подвоєння кількості станцій нівелювання. Запропонована методика спостереження на станції нівелювання дозволяє скоротити час на встановлення рівності пліч нівелювання і висоти променя (мінімального відліку по шкалі рейки), а також підвищити контроль на лінії нівелювання за сумарним кутом негоризонтальності променя візування.

У вересні 2011 р. проведено експериментальні дослідження способу нівелювання “вперед-назад” із використанням електронного нівеліра DNA 03 фірми Leica та комплекту кодових двометрових інварних рейок.

Згідно з програмою досліджень, нівелювання способом “вперед-назад” виконували з двох станцій. Плечі між станціями нівеліра 1 і 2 та рейками, що були встановлені та утримувались у вертикальному положенні за допомогою спеціальних тримачів на костиях в точках А і В, становили по  $d_{AB} = 49.8$  м. Експериментальні вимірювання проведено у сонячну погоду.

Найнижча точка візування на рейку була 0.60 м, а найвища – 1.93 м. Еквівалентні висоти проходження променя візування над асфальтом склали (29)  $h_{екв. AB} = 1.46$  м і  $h_{екв. BA} = 1.13$  м.

Під час вимірювання перевищень, у відлічування по шкалах рейок автоматично вводились поправки за кривину Землі. Виміряні перевищення способом “вперед” порівнювались з теоретичними та обчислювалась абсолютна похибка вимірювань.

Врахувавши поправки за кривину, сумарний кут  $\varepsilon''$  складається із осереднених кутових величин  $\bar{i}''$  – кута негоризонтальності візирного променя та  $\bar{r}''$  – кута вертикальної рефракції  $\varepsilon'' = \bar{i}'' - \bar{r}''$ .

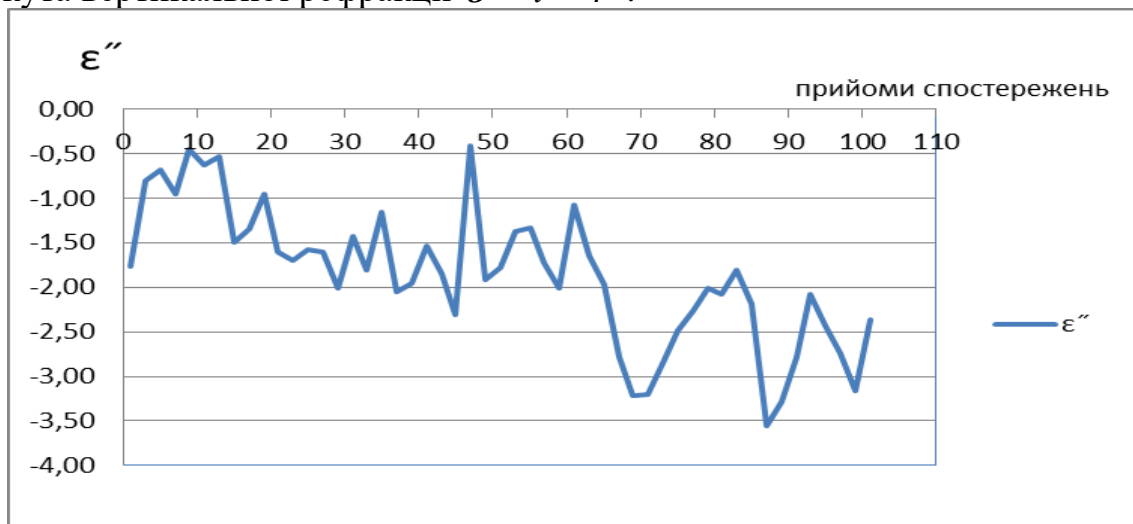


Рис. 5. Зміна сумарного кута  $\varepsilon''$  за 6-ти годинний період спостережень

Як видно із рис. 5, сумарний кут  $\varepsilon''$  не є стабільним за період спостережень і зазнає великих змін через дію вертикальної рефракції, оскільки, компенсатор нівеліра гарантує встановлення променя візування в горизонтальне положення з точністю 0.3". Так, його середня величина за весь період спостережень  $\varepsilon''_{сер.} = \bar{i}'' - \bar{r}'' = -1.86''$ , а середнє квадратичне відхилення від середнього його значення – 0.77".

Порівнюючи перевищення, визначені способом “вперед” і способом “вперед-назад” за весь період експериментальних спостережень, слід відзначити, що отримані результати способом “вперед-назад” у три рази точніші. С.к.п. у визначенні перевищення способом “вперед” склала 0.51 мм, а відповідна похибка способом “вперед-назад” дорівнює 0.16 мм.



Перевищення вздовж лінії А-В, визначене з нівелювання короткими плечима ( $\approx 6$  м), склало  $h^{meop.} = -0.7143$  м. Загально виконано 102 вимірювання перевищень способом “вперед” по лініях А-В, В-А що відповідає 2.5 км нівелірного ходу, виконаного за методикою “вперед-назад”.

Запропонований нами спосіб двостороннього геометричного нівелювання “вперед-назад” пройшов експериментальну апробацію 2009-2011 роках і показав реальні результати вимірювань перевищень порівняно із способом нівелювання із середини. Основні переваги даного способу полягають у контролі спостережень на лінії двостороннього нівелювання та введення поправок за вертикальну рефракцію у реальному часі. Реальна точність запропонованого методу у  $\sqrt{2}$  разів точніша за геометричне нівелювання із середини в основному, через уведення поправок за вертикальну рефракцію на нахилених ділянках траси.

Нами запропоновано спосіб визначення впливу ходу фокусувальної лінзи з врахуванням кута негоризонтальності променя візування та вертикальної рефракції. Дослідження ходу фокусувальної лінзи в нівелірах полягає в визначенні відхилень між вимірними перевищеннями по різних довжинах плечей нівелювання, використовуючи перефокусування зорової труби та із точно визначеними перевищеннями, отриманими методом “із середини”, тобто з рівними плечима, де перефокусування не виконується.

З метою визначення параметрів  $(i, k, c)$  запропоновано розв’язок системи рівнянь поправок:

$$\begin{pmatrix} -d_1/\rho'' & d_1^2/2R & -1 \\ \dots & \dots & \dots \\ -d_n/\rho'' & d_n^2/2R & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ k \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \dots \\ \Delta_n \end{pmatrix}, \quad (30)$$

де  $d_i$  – віддаль до визначуваних точок,  $i$  – кут негоризонтальності візирного променя,  $\rho'' = 206265''$ ,  $k$  – коефіцієнт вертикальної рефракції,  $b$  – постійна величина,  $\Delta_i$  – вільний член.

Отримавши із розв’язку нормальних рівнянь невідомі  $(i, k, c)$ , підставляємо їх у рівняння визначення поправок. Отримуємо величини  $v_n$ , які характеризують похибки лінзи фокусування.

Відповідно після розв’язування цієї системи похибка з номером  $n$  буде:

$$\frac{d_n^2}{2R}k - \frac{d_n}{\rho}i + b + \Delta_n = v_n. \quad (31)$$

Важливим є те, що безпосередньо з розв’язку системи рівнянь, отримуємо середнє значення кута  $i$  негоризонтальності візирного променя та середнє інтегральне значення коефіцієнта вертикальної рефракції  $k$  для досліджуваних віддалей на час спостережень.

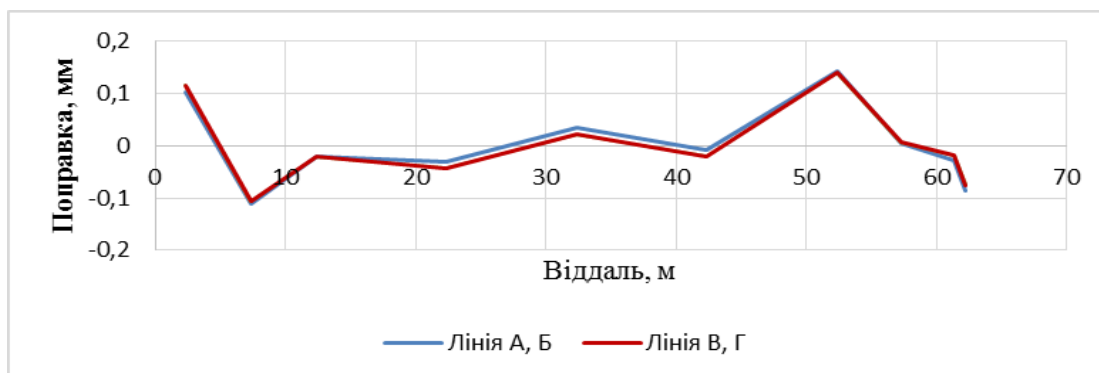


Рис. 6. Залежність похибки перефокусування від віддалі для нівеліра DiNi 03

Виконавши такі дослідження, величину поправки за перефокусування для різних віддалей до рейки можна вводити у результати спостережень (див. рис. 6.) Пропонуємо такі величини занести у пам'ять цифрового нівеліра для автоматичного їх розрахунку і введення в результати відлічувань.

Розглянуто і запропоновано нові способи компарування рейок в польових умовах. Результати компарування пари рейок бажано також занести в пам'ять комп'ютера цифрового нівеліра і на рейки нанести спеціальний штрих-код для їх ідентифікації. Це дало б можливість вводити поправки за компарування безпосередньо у конкретні відліки відповідної рейки у реальному часі вимірів.

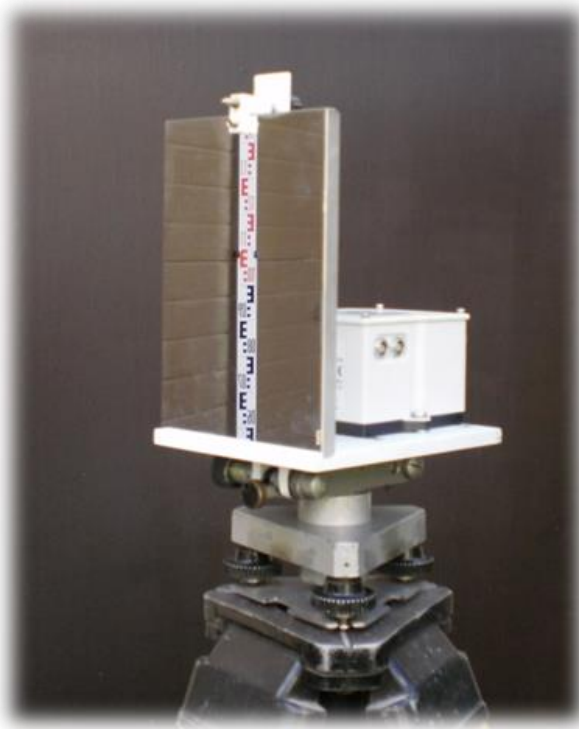


Рис. 7. Зображення рейки у дзеркальному компенсаторі на базі нівеліра НЗ із інклінометром NIVEL210

Для оперативного визначення вертикальної рефракції у реальному часі опрацьовано метод і зібрано лабораторний зразок нівеліра рефрактометра геометричного типу (див.рис.7).

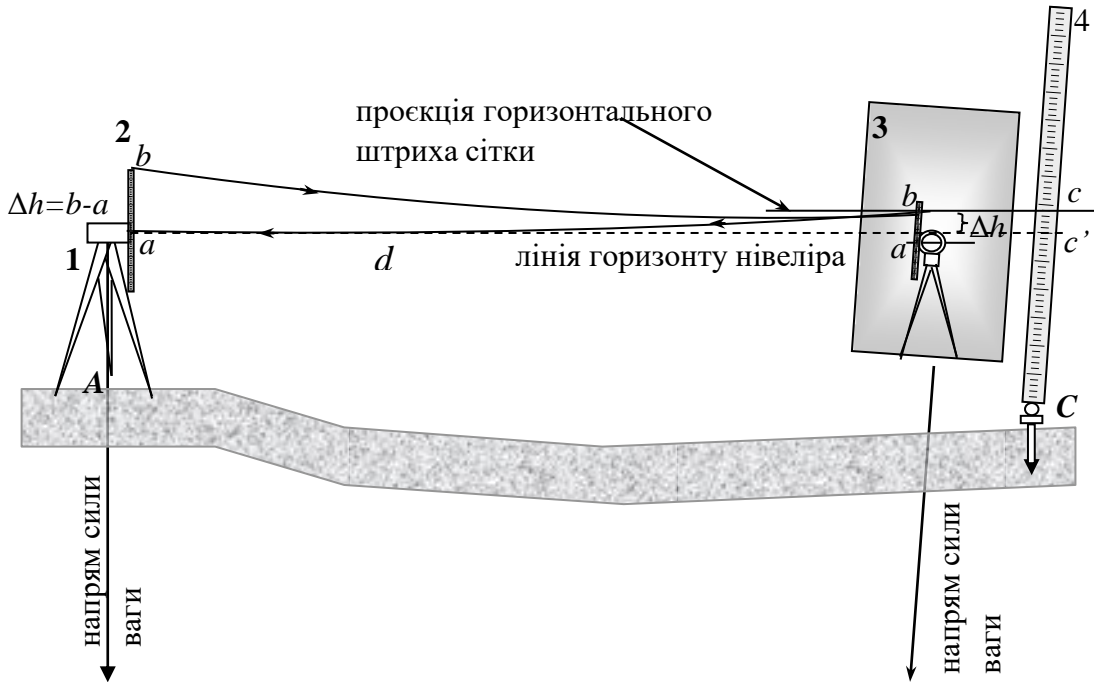


Рис. 8. Визначення вертикальної рефракції за допомогою прямовисно встановленого плоского дзеркального відбивача

В основу теорії рефрактометра покладено принцип відбитого променя від прямовисно встановленого дзеркального відбивача. Встановлення відбивача в прямовисне положення може відбуватись за допомогою рівнів або спеціальних компенсаторів. Ми використали електронний рівень інклінометра NIVEL210 фірми Leica. Загальний принцип побудови зображення шкали 2, що встановлена прямовисно біля нівеліра 1, зображено на рис. 8.

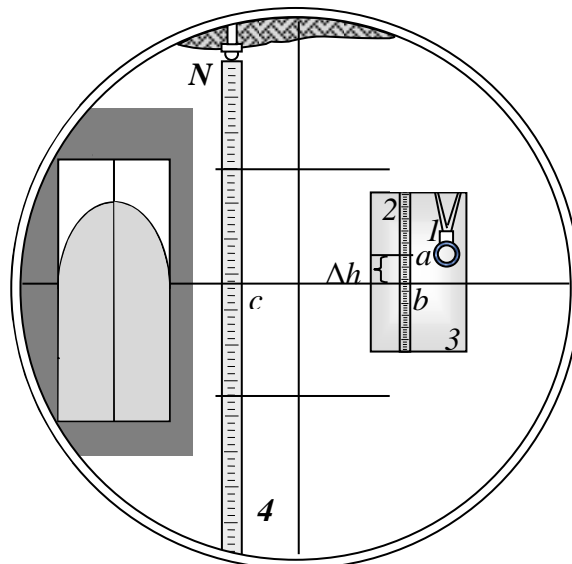


Рис. 9 Поле зору нівеліра з зображенням прямовисно встановленого плоского дзеркального відбивача 1 та рейки 4 в точці N

Вимірювання вертикальної рефракції виконують за зображенням самого об'єктива нівеліра або штриха чи додаткової шкали, яка прикріплена до нього,

у прямовисно встановленому плоскому дзеркальному відбивачі, який розташовують у кінцевій точці нівелювання. На рис. 8 показано хід променів зображення відлікової шкали, яка проєктується на горизонтальний штрих сітки ниток зорової труби нівеліра після проходження атмосфери по лінії прямо і зворотно від відбивача.

У точці  $N$  по напрямку, для якого визначають вертикальну рефракцію, встановлюють на місцевості прямовисно плоский дзеркальний відбивач 3 так, щоб зображення шкали рейки 2 було видно в нівелір 1 (див. рис.9). Поряд з відбивачем в процесі нівелювання в точці  $N$  встановлюють рейку 4 (для визначення вертикальної рефракції це не обов'язково).

Поправку за вертикальну рефракцію  $\Delta h_r$  у відлік по рейці, яка встановлена поряд із відбивачем, можна розрахувати, використовуючи такі залежності:

$$\Delta h_r = \frac{kd^2}{2R} = \frac{d^2}{2R} - \frac{\Delta h}{4} . \quad (32)$$

Вільний від вертикальної рефракції відлік  $c'$  обчислюють, використовуючи поправку  $\Delta h_r$ :

$$c'_r = c + \Delta h_r . \quad (33)$$

Відлік  $c'_r$  буде розташований на лінії, що практично збігається з центром об'єктива, якщо не враховувати поправку за кривину.

Експериментальні дослідження нівеліра-рефрактометра проведено на лінійному базисі у м. Дублянах. На кінцях 30 м ділянки базису встановлювали високоточний нівелір Dini 03 і нівелір-рефрактометр.



Рис. 10 Зміна коефіцієнта вертикальної рефракції під час періоду безперервних спостережень (22 прийоми)

За результатами експерименту обчислені виправлені зміщення  $\Delta h$ , за якими пораховані аномальні значення коефіцієнтів вертикальної рефракції і подані на рис. 10. Великий розмах коливань аномального коефіцієнта рефракції обумовлений короткою віддаллю спостереження.

Гранична точність визначення коефіцієнта вертикальної рефракції за період експериментальних спостережень дорівнювала 0.1.

Для застосування нівеліра рефрактометра під час нівелювання розроблено блок-схему автоматизованого комплексу, який забезпечив би вимірювання і опрацювання отриманих результатів із урахуванням вертикальної рефракції у реальному часі.

У четвертому розділі “Підвищення точності тригонометричного нівелювання на важливих великих промислових об’єктах” розглянуто підвищення точності геодезичних моніторингових спостережень. Зокрема розглянуто теоретичні і практичні можливості застосування кореляційних зв’язків спостережуваних напрямів для прогнозу та врахування вертикальної рефракції з метою підвищення точності тригонометричного нівелювання в реальному часі спостережень.

Численні експериментальні дослідження вертикальної рефракції різних авторів підтверджують наявність стохастичного взаємозв’язку між рефракціями різних напрямків з різними підстильними поверхнями.

Розглядаючи одночасні спостереження зенітних кутів двох суміжних напрямків, можна допустити лінійну залежність і встановити зв’язок між ними у вигляді рівняння лінійної регресії між двома напрямками:

$$Z_2 = \text{corr}_{Z_1 Z_2} \frac{m_{Z_2}}{m_{Z_1}} (Z_1 - \bar{Z}_1) + \bar{Z}_2, \quad (34)$$

де  $Z_1$  і  $Z_2$  - ряди вимірених зенітних віддалей відповідно за напрямками 1 і 2;

$\bar{Z}_1 = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{1,j}}{n}$  і  $\bar{Z}_2 = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{2,j}}{n}$  - середні значення зенітних віддалей, отримані із відповідних рядів;  $m_{Z_1}$  і  $m_{Z_2}$  середні квадратичні флуктуації зенітних віддалей, які розраховуються за формулою Бесселя;  $\text{corr}_{Z_1 Z_2}$  - коефіцієнт кореляції для незміщеної оцінки, який обчислюють за коваріаціями  $\text{cov}_{Z_1 Z_2}$ :

$$\text{corr}_{Z_1 Z_2} = \frac{\text{cov}_{Z_1 Z_2}}{(n-1)m_{Z_1}m_{Z_2}} = \frac{\sum_{j=1}^n (Z_{1,j} - \bar{Z}_1) \cdot (Z_{2,j} - \bar{Z}_2)}{(n-1)m_{Z_1}m_{Z_2}} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_{1,j} Z_{2,j} - \frac{\sum_{j=1}^n Z_{1,j} \sum_{j=1}^n Z_{2,j}}{n}}{n(n-1)m_{Z_1}m_{Z_2}}. \quad (35)$$

За умови сильного кореляційного зв’язку приймемо для спостережуваних напрямків  $\text{corr}_{Z_1 Z_2} = 1$ . Тоді отримаємо із (34) залежність:

$$\rho_{Z_2/Z_1} = \frac{Z_2 - \bar{Z}_2}{Z_1 - \bar{Z}_1} \cong \frac{m_{Z_2}}{m_{Z_1}} \cong \frac{\delta r_{a2}}{\delta r_{a1}} = q, \quad (36)$$

де  $\rho_{Z_2/Z_1} = \text{corr}_{Z_1 Z_2} \frac{m_{Z_2}}{m_{Z_1}}$  - коефіцієнт лінійної регресії.

На основі проведених нами досліджень, було отримано в лінійному наближенні твердження: “У просторово стаціонарному випадковому полі приземної рефракції відношення математичних сподівань кутів динамічної (аномальної) рефракції по двох напрямках пропорційне відношенню дисперсій

короткоперіодичних коливань зображень, відношенню еквівалентних висот до довжин ліній, а також коефіцієнту регресії часових процесів зміни рефракцій”.

Для двосторонніх спостережень часткові коефіцієнти вертикальної рефракції пропонується розраховувати за формулами:

$$\left. \begin{aligned} k_{AB} &= k_{nAB} + \frac{q_{kAB/BA}}{q_{kAB/BA} + 1} (\Sigma k - k_{nAB} - k_{nBA}) \\ k_{BA} &= k_{nBA} + \frac{1}{q_{kAB/BA} + 1} (\Sigma k - k_{nAB} - k_{nBA}) \end{aligned} \right\}, \quad (37)$$

де

$$\Sigma k = (k_{AB} + k_{BA}) = \frac{2R(h_{AB}^{глм.} + h_{BA}^{глм.})}{D_{AB}^2 \sin^2 Z_{AB}}. \quad (38)$$

Запропоновану методику врахування впливу вертикальної рефракції на результати неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання було перевірено під час створення опорних геодезичних мереж. Так у 2013 році виконано роботи зі створення опорної геодезичної мережі для будівництва Бескидського тунелю. Програмою робіт передбачалось виконання геометричного нівелювання II класу цифровим нівеліром DNA 03 з прив'язування пунктів планово-висотної мережі східного і західного порталів тунелю та нівелювання наявного тунелю з метою передачі висот між ними. А також вимірювання у лінійно-кутовій мережі автоматизованим тахеометром TCRP-1201 для визначення планових координат пунктів.

Лінійно-кутові вимірювання проведені за програмою, яка складалась із 8 прийомів вимірювання усіх кутів і довжин ліній мережі за двох положень вертикального круга тахеометра. Наведення тахеометра на відбивачі виконувалось автоматично із застосуванням спеціальної функції тахеометра спостереження на максимум відбитого сигналу. Неодночасні спостереження характеризувалися сонячною погодою із встановленою стратифікацією атмосфери та невеликими коливаннями зображень, зумовленими великою висотою променя над поверхнею спостереження.

Максимальні віддалі спостереження в мережі були 430 м. За результатами спостережень максимальне відхилення перевищення визначеного із геометричного нівелювання та неодночасного тригонометричного склало 1.7 мм, а с.к.п. визначення перевищення 0.9 мм.

Для встановлення можливості застосування наземних світловіддалемірних вимірів та тригонометричного нівелювання в 2012-2018 рр. було виконано високоточні лінійно-кутові вимірювання векторів на пунктах опорної геодезичної мережі Дністровської ГАЕС. Наземні лінійні спостереження виконано роботизованим тахеометром TCRP-1201. Вимірювання електронним тахеометром проведено в прямому і зворотному напрямі.

Максимальна с.к.п. визначення перевищення із двосторонніх неодноразових спостережень за період 2012-2016 рр. склала 3.9 мм для лінії п.Створний OGZ2-1А довжиною 1010 м.

Аналогічні експериментальні спостереження у 2014 році були виконані на пунктах напірного водопроводу Теребля-Ріцької ГЕС. Геодезична мережа характеризувалась довжинами ліній від 67 до 1267 м та перевищеннями до 269 м. У результаті врівноваження середня похибка у висотному положенні пунктів досліджуваної мережі склала 4.2 мм, за винятком одного дальнього пункту U – 6 мм. С.к.п. величин поправок у перевищення, які були попередньо виправлені за вертикальну рефракцію, склала 1.8 мм, а максимальне значення отримано по лінії P-2 – 5.0 мм.

Вихідними матеріалами для опрацювання даних моніторингових спостережень Дністровської ГЕС слугували архівовані файли формату XML (eXtensible Markup Language) спостережень, виконані з електронних тахеометрів Leica TM 30 протягом вересня місяця 2013 року. Виконуючи моніторингові спостереження, мета яких полягає у контролі стабільності положення спостережуваних точок і виявлення реальних їх зміщень, основним завданням постає введення у результати вимірювань поправок за атмосферну рефракцію. Проведено аналіз кореляційних зв'язків спостережуваних напрямів, запропоновано алгоритми введення поправок за вертикальну рефракцію у виміряні зенітні відстані способом рефракційного базису. Максимальне значення с.к.п. визначення перевищення склало 3.6 мм на відстані 518 м.

За даними, поданими компанією Leica Geosystems, проведено попередній аналіз лінійно-кутових спостережень візирних цілей мережі автоматизованого моніторингу Канівської ГЕС за період лютий – вересень 2014. Для опрацювання цих даних було створено спеціальне програмне забезпечення, яке дозволяє оперативно опрацьовувати необхідні виміри з формату XML, інтегрувати в них метеодані, подавати результати вимірів у вигляді часових серій спостережень, а також виконувати їх статистичне опрацювання.

На основі виконаних досліджень прийнято гіпотезу лінійної залежності зміни зенітних відстаней між спостережуваними напрямками. Прогнозовану зенітну відстань отримуємо, застосувавши рівняння лінійної регресії:

$$Z_{ij}^{прогн.} = corr_{Z_i Z_j} \frac{m_{Z_i}}{m_{Z_j}} Z_j + \left( \bar{Z}_i - \frac{m_{Z_i}}{m_{Z_j}} \bar{Z}_j \right), \quad (39)$$

де  $\bar{Z}_i = \frac{\sum_{j=1}^n Z_i}{n}$  - середнє значення зенітної відстані за останні моменти спостереження, коли матриця осереднення складається із останніх 30 спостережень, то  $n = 30$ .

Записуємо  $k-1$  рівнянь (39), де  $k$  кількість напрямів спостережень. За остаточне значення прогнозованої зенітної відстані можна прийняти значення, яке враховує всі зв'язки між напрямками, обчислене як середнє вагове, де за нормовані ваги можна використати коефіцієнти кореляції:

$$Z_i^{прогн.} = \frac{\sum_j^{n-1} (Z_{ij}^{прогн.} \text{corr}_{Z_i Z_j})}{\sum_j^{n-1} \text{corr}_{Z_i Z_j}} . \quad (40)$$

Оцінку вертикального зміщення напрямку спостереження проводять по відхиленню вимірної зенітної віддалі  $Z_i^{вим.}$  від її прогнозованого значення  $Z_i^{прогн.}$  :

$$Z_i^{вим.} - Z_i^{прогн.} \leq 3m_Z = 1.5'' . \quad (41)$$

Кутову величину прогнозованої вертикальної рефракції спостережуваного напрямку знаходимо за формулою:

$$r_i^{прогн.} = \bar{Z}_i - Z_i^{прогн.} . \quad (42)$$

За кутовою величиною обчислюємо значення коефіцієнта вертикальної рефракції.

Склавши систему лінійних рівнянь залежно від азимуту напрямку  $A$  та його зенітної відстані  $Z$  та розв'язавши її способом найменших квадратів, отримаємо двопараметричну модель коефіцієнта вертикальної рефракції на момент спостереження:

$$k_i^{модель} = K_1 A_i + K_2 Z_i + K_3 . \quad (43)$$

Виконавши оцінку точності моделі, її використовують для розрахунку виправлених зенітних відстаней та перевищень із урахуванням модельних значень коефіцієнтів вертикальної рефракції.

Розроблені методи дозволяють підвищити точність і ефективність геометричного та тригонометричного нівелювань і впроваджено у автоматизованих системах моніторингу просторових деформацій великих інженерних споруд.

### Висновки

У дисертаційній роботі виконано комплекс досліджень, який містить теоретичні розробки та рекомендації, направлені на вирішення важливої науково-практичної проблеми підвищення точності тригонометричного та геометричного нівелювання. Це доведено результатами теоретичних і експериментальних досліджень із використанням сучасних приладів і технологій. Напрацювання можуть бути застосовані при створенні державної висотної мережі, виконання наукових досліджень, спостережень за деформаціями і стійкістю унікальних споруд та потужних промислових комплексів.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено використання неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання із урахуванням вертикальної рефракції, в основі якого лежить принцип визначення поправок за дію вертикальної рефракції з використанням визначених флуктуацій зенітних відстаней (с.к.п. визначень перевищень) у момент спостережень. Точність неодночасного двостороннього



тригонометричного нівелювання із застосуванням високоточних електронних тахеометрів та врахуванням вертикальної рефракції по лініях спостереження 0.6 км - 1 км, відповідає точності геометричного нівелювання II класу.

2. Виведено формулу для визначення перевищення з двосторонніх спостережень із врахуванням вертикальної рефракції за флуктуаціями зенітних віддалей або визначених перевищень.

3. Експериментально доведена можливість визначення відхилення прямовисних ліній у заданому напрямі із використанням сумісних спостережень: двостороннього тригонометричного нівелювання з врахуванням вертикальної рефракції та GNSS - спостережень на тих самих пунктах. Рекомендовано отримані результати визначень відхилень прямовисних ліній застосовувати для обчислення нормальних висот.

4. Вперше розроблено теорію та апробовано методику виконання способу двостороннього геометричного нівелювання “вперед-назад”. В основі способу лежить принцип двостороннього дистанційного нівелювання. Спосіб підвищує точність нівелювання завдяки запропонованій методиці виконання спостережень, контролю сумарного кута негоризонтальності променя візування та врахуванню вертикальної рефракції по кожній лінії між зв’язковими точками, а також спрощує процес виконання нівелювання з розмічування ліній і контролю віддалей до рейок.

5. Виведено формулу розрахунку еквівалентних висот за результатами відлічувань рейок під час геометричного нівелювання, яка може бути використана для врахування вертикальної рефракції в реальному часі спостережень.

6. Розроблено способи компарування штрих-кодових рейок, які використовують у геометричному нівелюванні III і IV класів, що дозволяють прискорити процес його виконання та знизити вартість робіт. В основі способу лежить принцип порівняння штрих-кодових позначок із контрольним компарованим метром або компарованою рейкою із використанням фотофіксації результатів цифровою камерою.

7. Розроблено спосіб дослідження впливу похибок ходу фокусувальної лінзи нівеліра на стабільність положення візирного променя із врахуванням вертикальної рефракції. В основі способу лежить спостереження контрольних перевищень на різних віддальх від нівеліра із подальшим опрацюванням результатів способом найменших квадратів.

8. Вперше розроблено теорію визначення вертикальної рефракції за спостереженням зображення у прямовисно встановленому дзеркальному відбивачі. Рекомендовано виконувати спостереження зображення у прямовисно встановленому дзеркальному відбивачі для юстування геодезичних приладів (теодолітів, тахеометрів, нівелірів). На основі запропонованої теорії сконструйовано нівелір-рефрактометр, який дозволяє безпосередньо визначати вертикальну рефракцію в реальному часі спостережень. Гранична точність експериментального зразка склала 0.1 коефіцієнта вертикальної рефракції на віддалі 30 м. Запропоновано методику та технологічну схему застосування

нівеліра рефрактометра для автоматизації геометричного нівелювання з врахуванням вертикальної рефракції.

9. Розроблено методику побудови просторових динамічних рефракційних полів для геодезичних моніторингових спостережень із використанням кореляційних взаємозв'язків спостережуваних напрямів на момент спостережень у реальному часі. Апробація побудованих динамічних моделей просторових рефракційних полів за результатами геодезичних моніторингових спостережень на Дністровській і Канівській ГЕС дозволила підвищити точність результатів спостережень у два рази.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

#### 1.1. Праці у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які внесені до міжнародних наукометричних баз даних

1. Complex High Accuracy Satellite and Field Measurements of Horizontal and Vertical Displacements of Control Geodetic Network on Dniester Hydroelectric Pumped Power Station (HPPS) / K. Tretyak, S. Periy, I. Sidorov, L. Babiy. // *Geomatics and Environmental Engineering*. - vol. 9. - no. 1. – 2015. - pp. 83–96. <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2015.9.1.83> (Особистий внесок автора: виконані теоретичні та експериментальні дослідження тригонометричного нівелювання на опорній мережі Дністровської ГАЕС).

2. Спосіб вимірювання взірцевого базиса 2-го розряду для еталонування електронних тахеометрів / В. Літинський, А. Віват, С. Перій, С. Літинський // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». 2015. – Вип. 81. С. 59–65. (Особистий внесок автора: виконані експериментальні дослідження тригонометричного нівелювання на еталонному базисі).

3. Перій С. С. Апробація застосування неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання з урахуванням вертикальної рефракції / С. С. Перій // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2015. – Вип. 82. – С. 1–28.

4. Сідоров І. С. Визначення рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС супутниковими та наземними методами / І. С. Сідоров, С. С. Перій, В. Г. Сарнавський // *Геодинаміка*. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2015. – № 2 (19). – С. 15–25. (Особистий внесок автора: виконані експериментальні дослідження тригонометричного нівелювання та світловіддалемірних вимірювань ліній на опорній мережі Дністровської ГАЕС).

5. Perij S. Investigation of accuracy of methods of trigonometric leveling during the transmission of elevations over water surfaces / S. Perij, I. Pokotylo, T. Korliatovych // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2017. – Вип. 85. – С. 18–26. (Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження тригонометричного нівелювання над водною поверхнею озера Пісочне).

6. Investigation of refraction field over water surfaces / S. Periy, T. Korliatovych,

V. Litynskyu, I. Pokotylo // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2017. – Вип. 86. – С.11–18. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження тригонометричного нівелювання над водною поверхнею Бережанського ставу, опрацювання результатів вимірювань).*

## 1.2. Публікації у наукових фахових виданнях України

7. Перій С. С. Використання двостороннього тригонометричного нівелювання у світловіддалемірній полігонометрії / С. С. Перій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2001. – Вип.61. – С. 112–117.

8. Перій С. С. До визначення вертикальної рефракції при геометричному нівелюванні / С. С. Перій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2006. – Вип. I(11). – С. 146–150.

9. Літинський В. О. Тригонометричне нівелювання в ходах геодезичних мереж згущення / В. О. Літинський, С. С. Перій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2006, – Вип. II(12). – С. 125–133. *(Особистий внесок автора: опрацювання результатів вимірювань).*

10. Дослідження впливу нівелірної рефракції у нічний період за допомогою приладів зарядового зв'язку / В. О. Літинський, О. В. Киселик, С. С. Перій [та ін.] // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2007, – Вип. 69. – С. 94–97. *(Особистий внесок автора: опрацювання результатів вимірювань).*

11. Ващенко В. Урахування вертикальної рефракції під час створення знімальної основи і тахеометричного знімання / В. Ващенко, С. Перій, В. Літинський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2008. – Вип. 2 (16). С. 82–85. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження опрацювання результатів вимірювань).*

12. Ващенко В. Спосіб геометричного нівелювання з врахуванням вертикальної рефракції та негоризонтальності візирного променя / В. Ващенко, С. Перій, В. Літинський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2009. – Вип. 1 (17). С. 116–121. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

13. Спосіб фіксації вертикальних і горизонтальних дрижань візирних цілей / В. Літинський, О. Киселик, С. Перій [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2010. – Вип. 1 (19). – С. 87–90. *(Особистий внесок автора: виконані опрацювання результатів вимірювань).*

14. Перій С. Апробація способу геометричного нівелювання “вперед-назад” / С. Перій, В. Ващенко, І. Рій // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. – Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2010. – Вип.1(19).– С. 91–

94. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження опрацювання результатів вимірювань).*

15. Перій С. С. Експериментальні дослідження точності геометричного нівелювання способом “вперед-назад” / С. С. Перій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2010. – Вип. 73 – С. 45–52.

16. Перій С. С. Вимірювання вертикальної рефракції із застосуванням плоского дзеркального відбивача / Перій С. С. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 74. – С. 38–43.

17. Літинський В. Спосіб компарування штрихкодів рейок / В. Літинський, С. Перій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 1(21). – С. 77–79. . *(Особистий внесок автора: виконано обґрунтування точності запропонованого методу).*

18. Перій С. Застосування дзеркального відбивача для юстування нівелірів / С. Перій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 22. – С. 103–105.

19. Перій С. С. Дослідження ходу фокусувальної лінзи нівеліра Dini 22 / С. С. Перій, І. Ф. Рій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 75. – С. 58–61. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження, опрацювання результатів вимірювань).*

20. Перій С. С. Перспективи створення нівеліра рефрактометра / С. С. Перій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2012. – Вип. 76. – С. 53–56.

21. До питання геометричного нівелювання способом “вперед-назад” з використанням високоточного цифрового нівеліра Leica DNA 03 / С. С. Перій, І. Ф. Рій, О. І. Мороз [та ін.] // Вісник геодезії і картографії. – К. –2012. - № 4. – С. 5–8. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження, опрацювання результатів вимірювань).*

22. Перша GNSS – компанія у північному регіоні України / Я. Яцків, О. Хода, О. Терещук, ... С. Перій [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». –2012. – № 1(23). – С. 38–40. *(Особистий внесок автора: виконані експериментальні GNSS вимірювання).*

23. Савчук С. Дослідження точності визначення координат базової GNSS – станції Львівського національного аграрного університету / С. Савчук, В. Петак, С. Перій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2012. – № II(24). – С. 51–56. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, збір і виконання експериментальних GNSS вимірювань).*

24. Літинський В. О. Особливості застосування двостороннього тригонометричного нівелювання / В. О. Літинський, С. С. Перій, В. О. Сухоруков // Вісник геодезії та картографії. – К. –2013. –№ 1 (82). С. 10–13. *(Особистий внесок автора: виконані теоретичні дослідження,*

*опрацювання результатів вимірювань).*

25. Перій С. С. Визначення вертикальної рефракції за флуктуаціями вертикальних кутів / С. С. Перій, О. І. Мороз // Наукові праці Донец. нац. тех. ун-ту, Сер.: гірничо-геологічна. – 2013. – Вип. 1(18). – С. 49–55. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

26. Третьяк К. Р. Геодезичний моніторинг локального геодезичного полігону Дністровської ГАЕС / К. Р. Третьяк., С. С. Перій, І. С. Сідоров // Наукові праці Донец. нац. тех. ун-ту. Сер.: гірничо-геологічна. – 2013. – Вип. 1(18). – С. 61–69. *(Особистий внесок автора: виконано зрівноваження експериментальної лінійно-кутової мережі Дністровської ГАЕС).*

27. Спосіб дослідження ходу фокусувальної лінзи зорових труб нівелірів / В. Літинський Перій С., Тарнавський В. [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2016. – Вип. 1 (31). – С. 69-73. *(Особистий внесок автора: виконані теоретичні і експериментальні дослідження, виконані опрацювання результатів вимірювань).*

28. Застосування тригонометричного нівелювання для передавання висот над водними поверхнями / С. Перій, О. Мороз, Т. Корлятович [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2017. – Вип. I (33). – С. 65–68. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні спостереження та теоретичні дослідження).*

29. Літинський В. До встановлення допусків точного геометричного нівелювання / В. Літинський, І. Тревого, С. Перій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2018. – Вип. I (35). – С. 212–219. *(Особистий внесок автора: виконані теоретичні дослідження).*

30. Побудова площини нормального перерізу для виконання тригонометричного нівелювання за просторовими вимірюваннями GNSS / С. С. Перій, М. М. Фис, А. Р. Согор [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2018. – Вип. 2 (36). – С. 32–35. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

### 1.3 Патенти України

31. Пат. 41429. – Україна, UA, МПК (2009). – G01C 5/00. Спосіб геометричного нівелювання “Вперед, назад” / Перій С. С.; заявник і патентоутримувач Львів. нац. аграр. унів.– Бюл. № 24. – 25.05.2009. – С. 6.

32. Пат. 89466. – Україна, UA, МПК (2009). – G01C 5/00. Спосіб визначення середньоінтегрального коефіцієнта вертикальної рефракції / Перій С. С., Літинський В. О. – Бюл. № 2. – 25.01.2010. – С. 6. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

33. Пат. 93022. – Україна, UA, МПК (2009). – G01C 5/00. Спосіб компарування штрих-кодових рейок / Літинський В. О., Перій С. С., Літинський

С. В. – Бюл. № 24. – 27.12.2010. – С. 3.77. *(Особистий внесок автора: постановка завдання).*

34. Пат. 93341. – Україна, UA, МПК (2011.01), G01C 5/00. Спосіб виконання і юстирування основної перевірки нівеліра / Перій С. С. – Бюл. № 2. – 25.01.11. – С. 3.107.

35. Пат. 93646. – Україна, UA, МПК (2011.01), G01C 5/00. Спосіб нівелювання / Перій С. С. – Бюл. № 4. – 25.02.11. С. 3.141.

36. Пат. 93647 – Україна, UA, МПК (2011.01), G01C 5/00. Спосіб визначення вертикальної рефракції / Перій С. С. – № а2010 08167 ; заявл. 30.06.10; опубл. 25.02.11, Бюл. № 4.

37. Пат. 96724. – Україна, UA, МПК (2011.01), G01C 5/00. Спосіб визначення та виправлення місця нуля (місця зеніту) для приладів, що вимірюють вертикальні кути / Перій С. С., Ващенко В. І. – Бюл. № 22. – 25.11.2011. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

38. Пат. № 102584 – Україна, UA, МПК (2013.01), G01C 5/00. Нівелір – рефрактометр / Перій С. С. – № а2011 10393; заявл. 26.08.2011; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.

#### 1.4 Монографія

39. Вдосконалення методів геодезичних робіт та ГІС технологій в землеустрої, кадастрі та моніторингу земель. Монографія / [В. Ю. Андрущенко., О. Ю. Біда, О. І. Бочко, ... С. С. Перій та ін.]. за ред. П. П. Колодія, Є. І. Смірнова. - Львів: “Галицька видавнича спілка”. –2016. – 168 с. *(Особистий внесок автора: написані §§2.2 - 2.6).*

#### 2. Опубліковані праці апробаційного характеру

40. Перій С. Безпосереднє вимірювання вертикальної рефракції / С. Перій // “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології”: Зб. наук. доп. XVII Міжн. наук.-техн. симпоз. (Алушта, верес. 2012). – Львів: Вид. НУ «Львівська політехніка». – 2012. – С. 65–68.

41. Перій С. С. Нівелір - рефрактометр / С. С. Перій // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції “Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні”(м. Ужгород, 24-27 жовтня 2012 р.):– Ужгород. – 2012. – С.109-111.

42. Перій С. Врівноваження просторової мережі Дністровської ГАЕС з врахуванням вертикальної рефракції у програмному комплексі “МГ Сети” / С. Перій, О. Мороз, І. Сідоров // “Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології”: Зб. наук. доп. XVIII Міжн. наук.-техн. симпоз. (Алушта, верес. 2013). – Л., 2013. – С. 237-240. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконано зрівноваження експериментальної лінійно-кутової мережі Дністровської ГАЕС).*

43. Визначення інтервалів еталонного Бережанського базиса методом фотофіксації / С. С. Перій, О. І. Мороз, І. Я. Покотило, [та ін.] // Науковий вісник Ужгород. ун-ту, Сер Географія. Землеустрій. Природокористування.,

Ужгород, – 2014. – Вип.3. – С. 93–95. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження).*

44. Перій С. С. Визначення еквівалентних висот під час геометричного нівелювання / С. С. Перій, М. М. Фис // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції “Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні”(м. Ужгород - Синевир, 6-8 жовтня 2016 р.):– Ужгород: 2016. – С. 107-109. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

45. Перій С. С. Застосування тригонометричних ходів для створення висотної основи / С. С. Перій, Т. Ю. Корлятович, І. Я. Покотило // Моніторинг довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку: матеріали 8-ї Міжн. наук.-техн. конференції, 14-16 вересня 2017р. (Львів – Східниця) – Львів, Вид. НУ “Львівська політехніка” – 1 електронний оптичний диск (CD-ROM), 2017. – С. 73–78. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження).*

46. Перій С. Визначення прямокутних координат уявної точки перетину нормалей до еліпсоїда за даними GNSS спостережень / С. Перій, М. Фис, М. Согор // “GeoTerrace-2017”: матеріали Міжн. наук.-техн. конференції молодих вчених, 14-16 грудня 2017р.”. – Львів, Вид. НУ “Львівська політехніка”. – 2017. – С. 76–87. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані теоретичні дослідження).*

47. Апробація методу розвитку планово-висотної основи прокладанням "вільного" полігонометричного ходу / С. С. Перій, І. Я. Покотило, В. Л. Тарнавський [та ін.] // Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції, 4-6 жовтня 2018 р., – Ужгород.– С. 97–99. *(Особистий внесок автора: постановка завдання, виконані експериментальні дослідження).*

48. Літинський В. О. Еталонні базиси для електронних тахеометрів / В. О. Літинський, С. С. Перій, А. Й. Віват // Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні : матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції, 4-6 жовтня 2018 р., Ужгород. – С. 64 – 67. *(Особистий внесок автора: виконані теоретичні дослідження).*

## АНОТАЦІЯ

**Перій С. С. Теоретико-експериментальне обґрунтування методів підвищення точності тригонометричного та геометричного нівелювання – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.24.01 - Геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

З метою підвищення точності моніторингу деформацій великих інженерних споруд теоретично та експериментально доведена можливість застосування

неодночасного двостороннього тригонометричного нівелювання за точністю, яка задовольняє точність геометричного II класу на лініях спостережень до 1 км.

Напрацьована методика прокладання планово-висотних ходів без вимірювання висот візирних цілей та центрування приладу.

Розроблено спосіб виконання геометричного нівелювання за двосторонніми спостереженнями.

Сконструйовано та досліджено лабораторний зразок нівеліра-рефрактометра.

Розроблена та апробована методика створення динамічної просторової моделі рефракційного поля у реальному часі.

**Ключові слова:** геодезичне нівелювання, геометричне нівелювання, тригонометричне нівелювання, неоднчасне двостороннє тригонометричне нівелювання, вертикальна рефракція, рефрактометр, цифровий нівелір, роботизований електронний тахеометр, компарування рейок, геодезичний моніторинг інженерних об'єктів.

## АННОТАЦИЯ

**Пэрий С. С. Теоретико-экспериментальное обоснование методов повышения точности тригонометрического и геометрического нивелирования** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.24.01 - Геодезия, фотограмметрия и картография. - Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

С целью повышения точности мониторинга деформаций крупных инженерных сооружений теоретически и экспериментально доказана возможность применения неодновременного двустороннего тригонометрического нивелирования которая удовлетворяет точность геометрического II класса на линиях наблюдений до 1 км.

Наработана методика прокладки планово-высотных ходов без измерения высот визирных целей и центрирования прибора.

Разработан способ выполнения геометрического нивелирования по двусторонним наблюдениям.

Сконструирован и исследован лабораторный образец нивелира-рефрактометра.

Разработана и апробирована методика создания динамической пространственной модели рефракционного поля в реальном времени.

**Ключевые слова:** геодезическое нивелирование, геометрическое нивелирование, тригонометрическое нивелирование, неодновременное двухстороннее тригонометрическое нивелирование, вертикальная рефракция, рефрактометр, цифровой нивелир, роботизированный электронный тахеометр, компарирование реек, геодезический мониторинг инженерных объектов.



## ABSTRACT

**Perii S. S. Theoretical and experimental background of the methods for increasing the accuracy of trigonometric and geometric leveling** – On the rights of manuscript.

Thesis for the degree of Doctor's of Technical Sciences by speciality 05.24.01 - Geodesy, photogrammetry and cartography. - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis is devoted to trigonometric and geometric leveling - methods and recommendations for increasing their accuracy in modern conditions.

General information on the theory of trigonometric leveling and physics of atmosphere has been worked out in the thesis, including the analysis of the modern methods of leveling has been carried out; their accuracy, drawbacks and advantages.

Modern levels, rods, total stations manufactured by the leading companies of the world are characterized by digital counting fixation; using high-precision compensators, which ensure stabilization of the alignment beam with an accuracy of 0.2". This allows you to perform geometric leveling with an accuracy of 0.3 mm per 1 km of double stroke.

The possibility of using non-simultaneously double-way trigonometric leveling has been theoretically and practically proven taking into account vertical refraction on the accuracy of the corresponding geometric leveling of second-order on observation lines up to 1 km.

The use of non-simultaneous double-way trigonometric leveling for the determination of altitudes in polygonometers has been tested. The method of laying high-altitude traverses of trigonometric leveling without measuring the heights of the device and surveying targets has been worked out.

The analysis of the basic errors of geometrical leveling has been carried out. It is shown that the problem of accounting the vertical refraction in the process of leveling remains the most unresolved for today.

By analogy with trigonometric leveling, the method of double-way geometric leveling "forward-backward" has been proposed. This approach allows to improve the accuracy of geometric leveling due to control of the sum angle  $\varepsilon''$  - the non-horizontality of the alignment beam and vertical refraction, which is calculated in the process of measurement on the leveling line, and to take into account the effect of vertical refraction in the measured exceedances. The proposed method accelerates the leveling by reducing the time to choose the connecting points and alignment lines. Also, this method has been proposed for the implementation of high-precision geometric leveling by traversing in one direction in two lines, in two pairs of crutches.

The formula for determining the equivalent beam heights by reference to the rods and the height of the level through the leveling has been obtained. It has been proposed to use the obtained formula for the automatic calculation of the vertical refraction in the results of geometric leveling directly in the process of its implementation. For double-way geometric leveling, it has been suggested to take into account the vertical refraction at the determined equivalent heights and the

measured gradient of air temperature at an altitude of 1 m, or according to the fluctuations of the counting rods using a computer of a digital level.

The technique of field studies of levels has been developed to determine corrections for the non-horizontal aspect of the directional ray and the course of the focusing lens, which is recommended to key into the memory of the computer for automatic correction of the counting results, depending on the measured distance to the rod.

The possibility of determining the vertical refraction based on the results of observations by a horizontal directional ray of the image of a scale in a vertical flat mirror reflector has been theoretically substantiated.

The laboratory model of a geometric level-refractometer has been designed. Experimental studies of this model showed the ability to determine the vertical refraction coefficients with the boundary accuracy of 0.1 at the distance of 30 m.

The application of the automating system for the implementation of geometric leveling with the consideration of vertical refraction using a level-refractometer has been proposed.

The robotic electronic total stations of Leica are used for monitoring at important HPSs of Ukraine. The results of measurements by robotic total stations in the real atmosphere are distorted by errors in the radiation refraction. To reduce the magnitude of this error, a method for determining the vertical refraction and constructing a refractive field model using the correlation coefficient of refractions of different directions has been developed. The experimental researches of correlations of the observed directions have been carried out on the monitoring networks of Dniester and Kaniv HPPSs. The method of creating a dynamic refractive field model based on correlations between the directions of observation, which allows to calculate the values of vertical refractions of directions in real time, has been developed. The corrected results of measurements of zenith distances for the vertical refraction reduce the value of deviations of the calculated exceedances from the theoretical ones twice.

By experiment, on the example of adjustment of control networks of Beskyd Tunnel, Dniester HPPS, Tereblia-Rikska HPS, the possibility of using the double-way trigonometric leveling with the consideration of the vertical refraction on the fluctuations of zenith distances with the accuracy of geometric leveling of second-order has been proven.

**Key words:** geodetic leveling, geometric leveling, trigonometric leveling, non-simultaneous double-way trigonometric leveling, vertical refraction, refractometer, digital leveler, robotic electronic timer, compaction rods, geodetic monitoring of engineering objects.

Підписано до друку 28.10.2019 р.  
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.  
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 2,2. Обл.-видав. арк. 1,7.  
Тираж 100 прим. Зам. 191712.

Поліграфічний центр  
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”  
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів  
*Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.*