

ІНЖЕНЕРНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРОННИМИ ТАХЕОМЕТРАМИ

Розглянуто розробки науково-педагогічних працівників кафедри інженерної геодезії Національного університету “Львівська політехніка” в напрямі підвищення точності геодезичних вимірювань у будівництві, експлуатації та ремонті унікальних будівель, споруд чи окремого технологічного обладнання, що особливо важливо для їх безпечної експлуатації. Розроблено допоміжне приладдя (удосконалену світловідбивну марку, пристрій для лінійно-кутових вимірювань, сферичний відбивач із підставкою, двопризмовий давач-вектор) для підвищення точності вимірювань параметрів інженерних споруд електронними тахеометрами. На основі теоретичних розрахунків запропоновано оптимальне зображення геодезичної марки для візування на різних відстанях, а для компенсації похибки неперпендикулярності також тривимірний тримач. Розроблено методику та реалізовано її у пристрої для лінійно-кутових вимірювань, що дало змогу визначати довжини відрізків у межах від 1 до 30 м з точністю 0,1–0,3 мм. З метою передавання координат геодезичної основи від опорної мережі до точок виконання вимірювань будівельних конструкцій розроблено сферичний відбивач та підставку, за допомогою яких компенсують похибки за центрування, редуцію та вимір висот. Застосування розробленого сферичного відбивача апробовано під час відновлення проектного положення великогабаритного обладнання об’єкта енергетичного комплексу з точністю 0,5 мм. Для визначення розмірів споруд неправильної форми з метою мінімізації кутів нахилу призми (безпосереднього визначення координат вістря призми) теоретично обґрунтовано та розроблено двопризмовий давач-вектор. Досліджено точність визначення просторових координат давачем-вектором із використанням кінцевої міри як еталонного значення. За результатами досліджень відхилення віддалей, визначених за допомогою давача-вектора, від еталонного значення становить 0,3 мм.

Ключові слова: світловідбивна марка; пристрій для лінійно-кутових вимірювань; сферичний відбивач; давач-вектор; просторовий метод електронної тахеометрії; підвищення точності вимірювань електронними тахеометрами.

Вступ

У статті розглянуто розробки кафедри інженерної геодезії Національного університету “Львівська політехніка” в напрямі підвищення точності геодезичних вимірювань у будівництві, експлуатації та ремонті унікальних будівель, споруд чи окремого технологічного обладнання. Точність таких вимірювань регламентована Державними будівельними нормами (ДБН). У цих нормах геодезичний контроль виконують під час виготовлення будівельних конструкцій, розмічування на місцевості та монтажу обладнання [ДБН Б В.1.3-2: 2010]. ДБН передбачає контроль таких параметрів: прямолінійності, співвісності, горизонтальності, нахилу, вертикальності, паралельності, перпендикулярності, площинності, кривини [ДСТУ Б В.1.3-3:2011]. ДБН регламентують використання геодезичних методів: мікротріангуляції, трилатерації, гідро-

нівелювання, створних вимірювань із застосуванням обладнання: оптичних та цифрових теодолітів, електронних тахеометрів, лазерних створовказівників, інтерферометрів [ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009]. Водночас у ДБН питання використання приладдя, на якому виконують вимірювання електронними тахеометрами (марки, призми тощо), достатньо повно не розкрито.

Аналіз останніх досліджень

Контроль за збереженням геометричних параметрів особливо важливий під час ремонту чи заміни основних вузлів промислового обладнання, а саме: ротора та статора, валів турбіни. Наприклад, вивіряння положення окремих вузлів ротора та статора турбогенератора повинно забезпечувати точність 0,5 мм. Класичні методи встановлення великогабаритного обладнання використовують спеціальні центрошукачі (НІП-

МАШ, автоцентрошукач КНУБА) [Баран, 2012]. Звісно, забезпечити точність співвісності системою ППС-11 доволі складно, це потребує значних затрат часу, особливо у разі відновлення центра двометрового діаметра статора із ізоляційною обмоткою. Усі перелічені способи є механічними чи оптико-механічними і потребують великих затрат часу, людських ресурсів, а головне – не дають змоги автоматизувати контроль фізичних параметрів під час ремонту чи заміни обладнання.

У світовій практиці такі завдання вирішують координатними машинами типу “рука” [Petra-kov, & Shuplietsov 2018]. Ці машини з точністю вимірювання декілька мікрон можуть визначити центр за необхідною кількістю точок. Але залишається питання фіксування визначеного центра для подальшого його відтворення. У роботі [Zobrist, et al., 2009] досягнуто високої точності – декілька сотих міліметра у визначенні поверхні сферичного дзеркала із використанням лазерних трекерів та спеціальних сферичних відбивачів. Лазерний трекер – дещо удосконалений електронний тахеометр із точнішим віддалеміром та стабільнішою установкою. Згідно із [Leica TS30 White Paper] система зчитування кутів лазерного трекера та електронного тахеометра співрозмірні за точністю. Точність електронних тахеометрів для виконавчих знімачів досліджено в роботі [Бурак, 2011]. Можливість підвищення точності вимірювань на коротких віддальх показано у роботі [Літинський, 2014], де запропоновано метод лінійно-кутових вимірювань для підвищення точності визначення невеликих відрізків, а також методику оптимального планування точності визначення відрізка. В іншій статті [Літинський та ін., 2015] апробовано методику на взірцевому базисі другого розряду, а також досліджено можливість підвищення у три рази точності визначення десятиметрових відрізків електронними тахеометрами. У роботі [Vivat, et al., 2018] розглянуто можливість використання електронних тахеометрів зі сферичними відбивачами для визначення геометричних параметрів інженерних споруд. Також у цій роботі запропоновано використання візирних цілей на світловідбивній основі для підвищення точності візування. Усі ці дослідження можуть стати підґрунтям для

розроблення методики контролю геометричних параметрів великогабаритного обладнання.

Мета завдання

Дослідити та розробити допоміжне приладдя для підвищення точності вимірювань параметрів інженерних споруд електронними тахеометрами.

Методика та результати

1. Розроблення світловідбивної марки та 3Д-тримача

Для введення координат точки розташування електронного тахеометра в системі координат інженерної споруди чи великогабаритного обладнання будівельної конструкції необхідно виконати візування та вимірювання як мінімум на два пункти з відомими координатами. Тому для визначення координат вихідних пунктів візування здійснюють на світловідбивні марки [Vivat та ін., 2015]. Для підвищення точності вимірювань на світловідбивні марки необхідно забезпечити:

- максимум повернення лазерного випромінювання;
- необхідний розмір візирної цілі для певної віддалі;
- оптимальність візування за різних кутів нахилу;
- перпендикулярність падіння лазерного променя.

Перший етап можна реалізувати, вибравши світловідбивну плівку Oralite 6710.

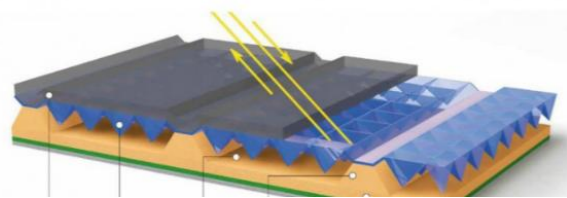


Рис. 1. Світловідбивна плівка

Виконання другого етапу залежить від кута розсіювання лазерного променя – χ . Діаметр перетину пучка d лазера на віддалі D можна обчислити за формулою [Костецька, 2000]:

$$d = \frac{\chi}{\rho} D, \quad (1)$$

де кут χ – важлива величина, але в жодній інструкції користувача до електронного тахеометра не наведено її значення.

Отже, з (1) визначаємо $d = 10$ мм для віддалі $D = 50$ м та обчислюємо $\chi = 40''$ для певного приладу (рис. 2).

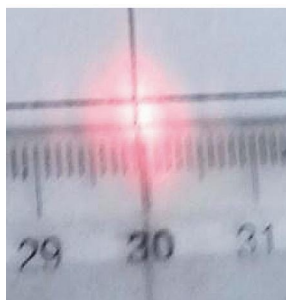


Рис. 2. Лазерний промінь тахеометра Leica TCRP1201R300

Підставивши в (1) $D = 100$ та 200 м, отримаємо відповідно $d = 19$ та 40 мм. Віддаль 200 м вважають граничною для високоточних інженерних вимірювань. Враховуючи проблему забезпечення перпендикулярності площини марки до променя, перехрестя ліній краще замінити точкою певного діаметра.

Розглянемо цю проблему детальніше, використавши формулу розрізнявальної здатності Релея (критерій Релея). Вказана формула стосується однаковою мірою усіх приладів, оскільки зумовлена розрізнявальною здатністю ока. Дві точки ми бачимо нарізно, якщо вони сприймаються різними світлочутливими клітинами на сітківці ока, а це відбувається, коли центр дифракційного диска однієї збігається із мінімумом на дифракційній картині другої. Інакше кажучи, умовою або межею розрізнявальної здатності (можливості бачити нарізно) є кутова півширина першого мінімуму дифракції від щілини.

Розрізняють лінійну розрізнявальну здатність – мінімальну віддаль між двома окремими точковими об'єктами, для яких вони сприймаються як окремі об'єкти, а не зливаються в один точковий об'єкт; та кутову – мінімальний кут між точковими об'єктами, коли вони ще сприймаються як окремі об'єкти.

Розрізнявальна здатність оптичних приладів обмежена як фундаментальними фізичними законами (наприклад, дифракцією світла), так і недосконалістю приладу.

Умову оптичної розрізнявальної здатності записують у вигляді:

$$\frac{d}{D} = 1,22 \frac{\lambda}{a}, \quad (2)$$

де $\lambda = 570$ нм – середня довжина хвилі оптичного діапазону; $a = 2$ мм – середній діаметр зіниці ока людини; d – віддаль між двома точками, на якій їх спостерігають як окремі; D – віддаль від спостерігача до візирної цілі.

Ввівши у (2) значення ρ – кількість секунд у радіані та ν – збільшення зорової труби, отримаємо формули для визначення граничної роздільної здатності під час візування оком та зоровою трубою:

$$\frac{d}{D} = 1,22 \frac{\lambda \cdot \rho}{a}, \quad (3a)$$

$$\frac{d}{D} = 1,22 \frac{\lambda \cdot \rho}{a \cdot \nu}. \quad (3б)$$

Підставивши значення у наведені формули, зведемо їх до одних одиниць, наприклад, метрів:

$$\left(\frac{d}{D}\right)_{\text{Око}} = 1,22 \frac{0,00000057 \cdot 206265}{0,002} = 71,71,$$

$$\left(\frac{d}{D}\right)_{\text{Зорова труба}} = 1,22 \frac{0,00000057 \cdot 206265}{0,002 \cdot 30} = 2,4.$$

Розрахуємо граничну розрізнявальну здатність d для різних віддалей D . Отримані результати наведемо у табл. 1. Ці розрахунки підтверджуються результатами перевірки гостроти зору Головіним – Сівцевим [Чиж та ін., 2013], за якими 100 % вважають зір людини, яка з 5 м може розрізнити рядок із віддальми між елементами 3 мм.

На рис. 3 графічно наведено значення табл. 1 для зорової 30^* труби.

Таблиця 1

Гранична лінійна розрізнявальна здатність на різних віддальх для ока та труби із збільшенням 30^*

D , м	5	10	20	30	40	50
d , мм око	1,7	3,5	7	10,5	14	17,5
d , мм З.Т.	0,06	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6

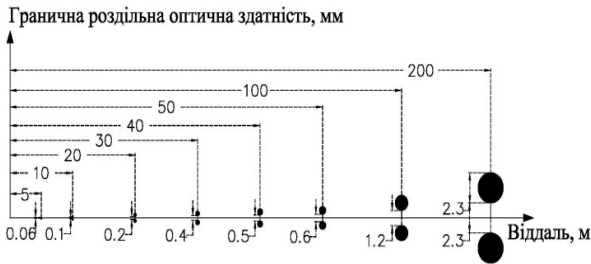


Рис. 3. Гранична лінійна розрізнявальна здатність на різних відстанях для труби із збільшенням 30*

На підставі теоретичних розрахунків пропонуємо оптимальне зображення геодезичної марки для візування на різних відстанях, яке подано на рис. 4.

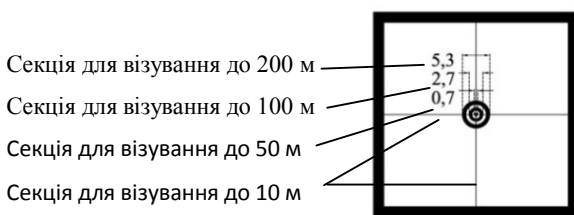


Рис. 4. Зображення марки для точного візування на різних відстанях

Для забезпечення високої точності вимірювань та компенсації похибки неперпендикулярності рекомендовано обмірювальні геодезичні роботи розпочинати із планування у тривимірному просторі. Для реалізації цієї мети розроблено тривимірний тримач (рис. 5).



Рис. 5. Тривимірний тримач

Виведемо формули для визначення кута β між гранями 3D марки та кута нахилу марки – v :

$$\beta^\circ = \alpha_{\text{Падіння}} + 180^\circ - \alpha_{\text{Перешкоди}} - 90^\circ, \quad (3\text{в})$$

$$v^\circ = \arctan \frac{h}{d}. \quad (3\text{г})$$

Вихідними даними для їх обчислень є координати, отримані з проекту та рекогностування інженерного об'єкта. На рис. 6 подано пояснення до обчислення кутів β та v .

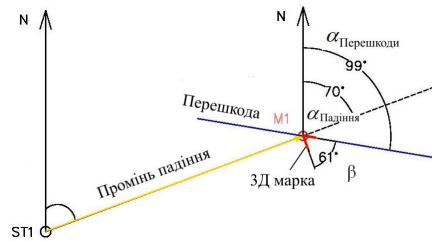


Рис. 6. До розрахунку кута між гранями 3D-відбивача

2. Розроблення пристрою для лінійно-кутових вимірювань

На рис. 7, а показано запропонований пристрій на геодезичному центрі, носієм координат якого є 14 мм отвір із відбивною плівкою, а на рис. 7, б – зі стандартним мінівідбивачем. Пристрій складається із стержня завдовжки приблизно 130 мм, який нижньою частиною входить у отвір підставки. На стержні закріплено сферичний рівень із ціною поділки 5', який має виправні гвинти. Нижня частина стержня куляста. Діаметр кулі 14,2–14,5 мм, якщо діаметр отвору центра 14 мм. Нижня частина кулі закінчується конусоподібним виступом, що є продовженням осі стержня. Цей виступ використовують для установлення стержня на накерненні чи засвердлені невеликим діаметром центри. У верхній частині стержня є різьба для установлення на ньому відбивачів та кутомірних марок. На рис. 7, а показано прикріплену на стержень марку для лінійно-кутових вимірювань, яку ми запропонували. Марка виготовлена у вигляді двох симетрично розташованих відносно осі стержня отворів. Віддаль між отворами приблизно 0,5 мм. Отже, марка для вимірювання горизонтальних кутів – це дві дуги, що дають змогу зменшити похибку візування для різних віддалей. На марку наклеєна світловідбивна плівка, яку ми спеціально виготовили. У корпусі підставки є три підймальних гвинти із малим кроком різьби. За допомогою цих підймальних гвинтів бульбашку сферичного рівня приводять на середину.

Пристрій складається із таких деталей: 1 – марка для лінійно-кутових вимірювань; 2 – стержень; 3 – підймальні гвинти; 4 – підставка; 5 – кулясте закінчення стержня, яке установлюють в отвір знака; 6 – сферичний рівень; 7 – виправні гвинти рівня. Прилад показано на геодезич-

ному центрі 9 з отвором 8. Також на пристрій можна встановити відбивач 10, за допомогою переходника 11. Пристрій установлюють на знак так, щоб куля потрапляла в отвір знака. Якщо розмір отворів 1–3 мм, то в отвір установлюють конусоподібний виступ 12 (рис. 7, б).

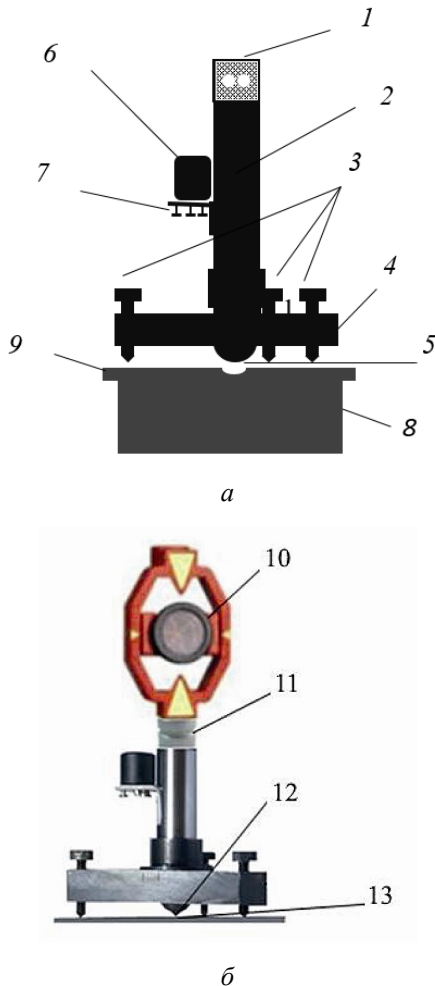


Рис. 7. Пристрій для лінійно-кутових вимірювань на трубчастому центрі (а) та на знаках, носієм центра є 1–3 мм отвір (б)

У пропонуваному пристрої віддаль від поверхні установлення на центр знака до верху марки приблизно 140 мм. Ціна поділки сферичного рівня 5'. Прийнято вважати, що точність установлення бульбашки сферичного рівня на середину – 0,15 ціни поділки рівня. Отже, похибка центрування марки над сферичною головкою стержня дорівнюватиме 0,03 мм. Підвищення точності можна досягти установленням точнішого рівня, наприклад, бочкоподібного. Радіальна щілина між дотичними поверхнями стержня і підставки 0,004 мм. Таке хитання осі сте-

ржня у корпусі підставки, якщо віддаль від поверхні прилягання стержня до знака від верху підставки 50 мм, дорівнюватиме 0,28', що призведе до похибки центрування марки 0,01 мм. Сумарна похибка центрування марки стержня дорівнюватиме 0,032 мм.

Для вимірювань потрібно принаймні два пристрої (краще три чи більше залежно від типу робіт).

До початку вимірювань виконують перевірку пристрою:

Умова: вісь сферичного рівня має бути паралельна до осі стержня.

Для перевірки пристрій установлюють на трубчастому знакові, центром якого є отвір. За допомогою підіймальних гвинтів підставки приводять бульбашку рівня на середину. Обертають стержень на 180°. Допустиме відхилення 0,2 поділки, що відповідає 1'. Отже, вісь стержня буде установлена прямовисно з точністю 0,5'.

Умова: вісь марки повинна збігатися із віссю обертання стержня.

На віддалі 5 м від марки установлюють, наприклад, 1' електронний тахеометр. Візують на марку перегинку між двома отворами. Відлічують горизонтальний круг. Обертають марку на 180°. Знову візують і відлічують горизонтальний круг. Так роблять кілька разів. Точність виміряного кута між двома положеннями марки дорівнюватиме приблизно 1,4'. Це дасть змогу визначити, для таких вимірювань положення перетину марки щодо осі стержня з точністю 0,03 мм. Всі вимірювання, зазвичай, виконують для двох положень марки, тому ця похибка практично вилучається.

Умова: визначають приладову поправку світловіддалеміра.

Поправку можна визначити, якщо немає базису, вимірюванням цілої лінії S і двох її частин S_1 і S_2 . Приладова поправка K дорівнюватиме $K = S - (S_1 + S_2) + 0,5t$, де t – віддаль між світловідбивними плівками (товщина марки).

У роботі [Літинський та ін., 2015] здійснено апробацію розробленого пристрою для лінійно-кутових вимірювань на лінійному базисі другого розряду. Порівняння еталонних відрізків та визначених за допомогою пристрою підтвердило високу апріорну оцінку точності. Різниця

віддалей були у межах 0,1–0,3 мм інтервалів різної довжини 1–30 м відповідно. Такі результати підтверджують підвищення фактично на один порядок точності вимірювання відрізків електронними тахеометрами.

3. Розроблення сферичного відбивача

Для передавання координат геодезичної основи від вихідного базису до точок виконання вимірювань будівельних конструкцій також розроблено сферичний відбивач та підставку, використання яких компенсує похибки зацентрування, редуцію та вимірювання висот.

З геометричних міркувань вплив неперпендикулярності можна вилучити суміщенням центрів трипельпризми та сферичної оправи. Оскільки трипельпризми виготовляють зі скла К8 із коефіцієнтом заломлення $n = 1,518$, то згідно з [Русинов, 1984] запишемо формулу визначення віддалі від передньої площини трипельпризми до оптичного центра:

$$\Delta = \frac{H}{n}, \quad (4)$$

де H – висота трипельпризми є технічною характеристикою для виготовлення; n – коефіцієнт заломлення, який залежить від виду скла.

Розроблений сферичний відбивач (рис. 8) складається із таких елементів: 1 – сфера необхідного діаметра залежно від діаметра трипельпризми; 2 – пружинна пластина; 3 – трипельпризма; 4 – притискна шайба; 5 – закріпна шайба; 6 – центр сфери; 7 – оптичний центр трипельпризми.

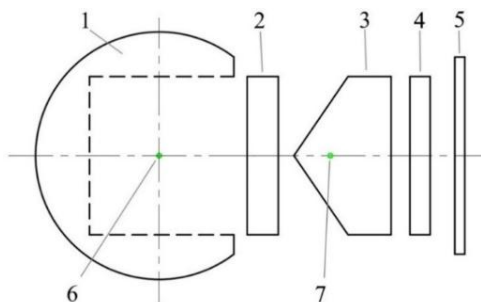


Рис. 8. Розроблений сферичний відбивач

Така конструкція дає можливість сумістити центр сфери та центр трипельпризми із точністю 0,1 мм, що забезпечить під час вимірювання незмінність координат центра трипельпризми

навіть у разі розвороту сфери на кут 30° . Ми виготовили сферичний відбивач для трипельпризми діаметром 25,4 мм та висотою 19 мм. Діаметр сфери становить 42 мм з отвором, глибина якого 30 мм та діаметр 25,5 мм, пружна пластина 4 на 25 мм, притискна шайба 1,5 мм на 25 мм та закріпна шайба 1 мм на 30 мм. Перевірка (рис. 9, 10) підтвердила стабільність просторового положення центра трипельпризми у разі повороту сфери. Виміряна віддаль на сферичний відбивач у положенні a та b була у межах 0,2 мм. Згідно із [Спосіб визначення... патент, 2020] визначено абсолютну поправку сферичного відбивача, яка дорівнює $-17,5$ мм.

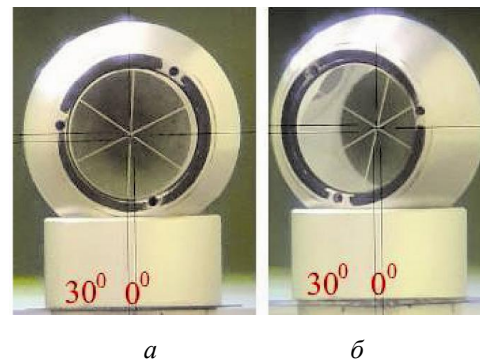


Рис. 9. Перевірка центрування трипельпризми у розробленому сферичному відбивачі

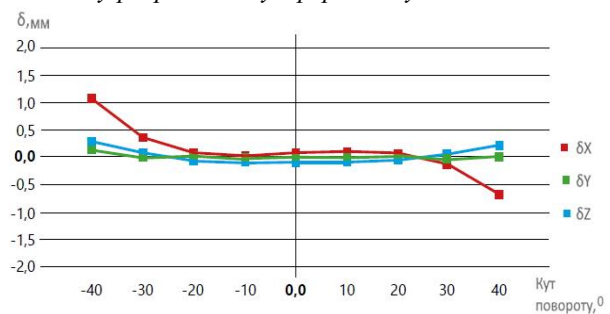


Рис. 10. Дослідження впливу кута розвороту на зміну координат оптичного центра

Розроблений сферичний відбивач застосовано під час відновлення проектного положення статора генератора на Запорізьській АЕС [Vivat, et al., 2022]. Опорну мережу створено за методикою лінійно-кутових вимірювань. Всі віддалі та кути вимірювали електронним тахеометром із використанням розробленого сферичного відбивача. Довжини сторін були у межах 10–30 м, а кути: горизонтальні 30 – 90° , вертикальні 0 – 5° .

4. Розроблення двопризмового вектора

Для визначення розмірів споруд неправильної форми необхідно розробити давач, який можна довільно встановлювати та визначати координати вістря. Ми запропонували двопризмовий давач-вектор. У статті [Bösemann, (2016)] обґрунтовано необхідність та можливість використання такого пристрою. Нижче описано його переваги та досліджено точність під час вимірювань.

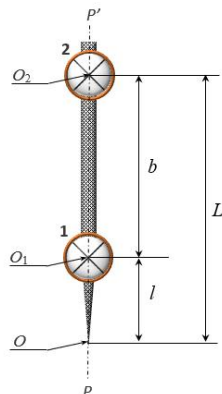


Рис. 11. Основні елементи двопризмового вектора

PP' – головна вісь вектора;

1, 2 – трипельпризми;

O – полюс вектора;

O_1, O_2 – оптичні центри відбивних призми 1 та 2 відповідно;

L – полярна відстань точки O_2 (відстань між полюсом вектора O та оптичним центром відбивача 2);

l – полярна відстань точки O_1 (відстань між полюсом вектора O та оптичним центром відбивача 1);

b – базис (відстань між оптичними центрами відбивачів 1 (точка O_1) і 2 (точка O_2));

$r = b/L$ – відношення базису до полярної відстані точки O_2 ;

$k = l/L$ – відношення полярної відстані точки O_1 до полярної відстані точки O_2 ;

$q = l/b$ – відношення полярної відстані точки O_1 до довжини базису.

Головна геометрична умова

Полюс вектора O , оптичні центри відбивачів O_1 та O_2 повинні належати осі PP' . Виконання головної геометричної умови відповідає такому математичному співвідношенню

$$L = l + b. \quad (5)$$

Розглянемо математичні співвідношення для обчислення координати точки полюса за відомими координатами оптичних центрів відбивачів.

Позначимо: x_1, y_1, z_1 – відомі координати точки оптичного центра O_1 ; x_2, y_2, z_2 – відомі координати точки оптичного центра O_2 ; x_0, y_0, z_0 – невідомі координати полюса O .

Адаптувавши рівняння прямої лінії в просторі для умов нашої задачі, отримуємо

$$\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{y_2 - y_0} = \frac{z_1 - z_0}{z_2 - z_0} = \frac{l}{L} = k. \quad (6)$$

або

$$\frac{x_2 - x_1}{x_2 - x_0} = \frac{y_2 - y_1}{y_2 - y_0} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_0} = \frac{b}{L} = r, \quad (7)$$

або

$$\frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_1} = \frac{y_1 - y_0}{y_2 - y_1} = \frac{z_1 - z_0}{z_2 - z_1} = \frac{l}{b} = q. \quad (8)$$

Запишемо вирази для обчислення координати точки полюса з останнього рівняння

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_1 - q(x_2 - x_1) \\ y_0 &= y_1 - q(y_2 - y_1) \\ z_0 &= z_1 - q(z_2 - z_1) \end{aligned} \right\} \rightarrow \left. \begin{aligned} x_0 &= (1 + q)x_1 - qx_2 \\ y_0 &= (1 + q)y_1 - qy_2 \\ z_0 &= (1 + q)z_1 - qz_2 \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Або в такому вигляді

$$\begin{aligned} x_0 &= p_1 x_1 - p_2 x_2 \\ y_0 &= p_1 y_1 - p_2 y_2, \\ z_0 &= p_1 z_1 - p_2 z_2 \end{aligned} \quad (10)$$

де p_1, p_2 – певні вагові коефіцієнти, значення яких можна обчислити, знаючи значення співвідношень лінійних елементів базису l, b, L . У табл. 2 наведемо вирази для обчислення вагових коефіцієнтів залежно від безрозмірних характеристик базису.

Аналізуючи результати, наведені в табл. 2, зауважимо одну особливість вагових коефіцієнтів – їх різниця $P_1 - P_2$ завжди дорівнює одиниці.

Отже, рівняння можуть слугувати робочими для обчислень координат точок полюса. Для обчислення вагових коефіцієнтів у (9) рекомендуємо використовувати співвідношення, наведені в останньому стовпці табл. 2.

Таблиця 2

Обчислення вагових коефіцієнтів залежно від безрозмірних характеристик базису

Вага / безрозмірна характеристика базису	$k = \frac{1}{L}$	$r = \frac{b}{L}$	$q = \frac{1}{b}$
P_1	$1-(1-k)$	$1/r$	$1+q$
P_2	$k/(1-k)$	$(1-r)/r$	q
P_1-P_2	1	1	1

Точність визначення координат точки полюса залежно від точності визначення лінійних елементів вектора

Вважатимемо, що головна геометрична умова вимірювального вектора виконується (точка полюса та оптичні центри трипеліпризм лежать на одній прямій). З'ясуємо, як впливає точність визначення лінійних елементів вектора на точність визначення координат полюса. Для цього виконаємо таку заміну в рівнянні (9) $q = 1/b$. Отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x_1 - \frac{l}{b}(x_2 - x_1) \\ y_0 &= y_1 - \frac{l}{b}(y_2 - y_1) \\ z_0 &= z_1 - \frac{l}{b}(z_2 - z_1) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Вважатимемо також, що координати оптичних центрів x_1, y_1, z_1 та x_2, y_2, z_2 визначено безпомилково. Нехай $m_{x_0}, m_{y_0}, m_{z_0}$ – середні квадратичні похибки визначення координат полюса x_0, y_0, z_0 , відповідно; m_l, m_b – середні квадратичні похибки лінійних елементів вимірювального базису l та b .

Застосуємо правило обчислення середньої квадратичної похибки функції вимірюваних величин до рівняння (11). Матимемо:

$$\left. \begin{aligned} m_{x_0}^2 &= \left(\frac{\partial x_0}{\partial l}\right)^2 m_l^2 + \left(\frac{\partial x_0}{\partial b}\right)^2 m_b^2 \\ m_{y_0}^2 &= \left(\frac{\partial y_0}{\partial l}\right)^2 m_l^2 + \left(\frac{\partial y_0}{\partial b}\right)^2 m_b^2 \\ m_{z_0}^2 &= \left(\frac{\partial z_0}{\partial l}\right)^2 m_l^2 + \left(\frac{\partial z_0}{\partial b}\right)^2 m_b^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Обчисливши значення часткових похідних у (12) та вважаючи, що середні квадратичні похибки визначення лінійних величин однакові $m_l = m_b = m_{lin}$, запишемо остаточні рівняння

$$\left. \begin{aligned} m_{x_0}^2 &= (x_2 - x_1)^2 \left(\frac{l^2 + b^2}{b^4}\right) m_{lin}^2 \\ m_{y_0}^2 &= (y_2 - y_1)^2 \left(\frac{l^2 + b^2}{b^4}\right) m_{lin}^2 \\ m_{z_0}^2 &= (z_2 - z_1)^2 \left(\frac{l^2 + b^2}{b^4}\right) m_{lin}^2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Додамо усі рівняння в (13), беручи до уваги, що квадрат середньої квадратичної похибки просторового розташування точки полюса $M_0^2 = mx_0^2 + my_0^2 + mz_0^2$, отримаємо

$$\begin{aligned} M_0^2 &= ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + \\ &+ (z_2 - z_1)^2) \cdot \left(\frac{l^2 + b^2}{b^4}\right) m_{lin}^2. \end{aligned} \quad (14)$$

Зважаючи на те, що

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 = b^2,$$

запишемо остаточну залежність середньої квадратичної похибки визначення просторових координат полюса від точності визначення лінійних елементів базису

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

де $q = 1/b$.

Як бачимо, в цьому випадку точність визначення просторового розташування не залежить від довжини базису, а залежить лише від точності вимірювання його лінійних елементів та їх відношення. А $\sqrt{1 + q^2}$ слугує масштабним множником лінійної похибки. Чим менше q , тим менше впливає точність лінійних вимірів на точність визначення просторового розташування точки полюса.

Точність визначення координат точки полюса залежно від точності визначення координат оптичних центрів відбивачів

Як і в попередньому випадку, вважатимемо, що головна геометрична умова вимірювального базису виконується (точка полюса та оптичні центри відбивачів лежать на одній лінії), а безрозмірний коефіцієнт $q = l/b$ визначено безпо-

милково. Нехай m_{x_1} , m_{y_1} , m_{z_1} – середні квадратичні похибки визначення координат x_1 , y_1 , z_1 оптичного центра першого відбивача, а m_{x_2} , m_{y_2} , m_{z_2} – середні квадратичні похибки визначення координат x_2 , y_2 , z_2 – оптичного центра другого відбивача відповідно. Застосуємо знову правило визначення середньої квадратичної похибки функції вимірних величин до рівняння (9). Запишемо результат без проміжних викладок

$$\left. \begin{aligned} m_{x_0}^2 &= (1-q)^2 m_{x_1}^2 + q^2 m_{x_2}^2 \\ m_{y_0}^2 &= (1-q)^2 m_{y_1}^2 + q^2 m_{y_2}^2 \\ m_{z_0}^2 &= (1-q)^2 m_{z_1}^2 + q^2 m_{z_2}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Як і в попередньому випадку, позначимо $M_0^2 = mx_0^2 + my_0^2 + mz_0^2$ і додамо усі рівняння у (16). Одержимо

$$M_0^2 = (1+q)^2 (mx_1^2 + my_1^2 + mz_1^2) + q^2 (mx_2^2 + my_2^2 + mz_2^2). \quad (17)$$

Очевидно, що $mx_1^2 + my_1^2 + mz_1^2 = M_1^2$, $mx_2^2 + my_2^2 + mz_2^2 = M_2^2$ – квадрати середньоквадратичної похибки просторового розташування оптичних центрів відбивачів 1 і 2 відповідно. Тоді матимемо

$$M_0^2 = (1+q)^2 M_1^2 + q^2 M_2^2. \quad (18)$$

Вважатимемо, що точність визначення координат оптичних центрів відбивачів є однаковою, тобто $M_1^2 + M_2^2 = M_p^2$, і запишемо остаточний вираз:

$$M_0^2 = \sqrt{(1+q)^2 + q^2} M_p. \quad (19)$$

Вплив зміни температури на точність визначення координат полюса

Доведемо, що температурне розширення/стиснення основи стержня давача-вектора не вплине на точність визначення координат. Для цього запишемо температурні рівняння зміни довжини лінійних елементів базису

$$\begin{aligned} L &= L_0(1 + \tau(t - t_0)), \\ l &= l_0(1 + \tau(t - t_0)). \end{aligned} \quad (20)$$

Оскільки $b = L - l$, то

$$\begin{aligned} L_0(1 + \tau(t - t_0)) - l_0(1 + \tau(t - t_0)) &= \\ = b_0(1 + \tau(t - t_0)) \end{aligned}, \quad (21)$$

де τ – коефіцієнт теплового розширення матеріалу, з якого виготовлено базис;

L_0 , l_0 , b_0 – значення лінійних елементів базису, визначені за температури t_0 ;

L , l , b – значення лінійних елементів базису, визначені за температури t .

У робочих формулах використано коефіцієнт $q = l/b$. Подамо вираз для його обчислення з урахуванням температурної зміни довжини лінійних елементів базису

$$q = \frac{l}{b} = \frac{l_0(1 + \tau(t - t_0))}{b_0(1 + \tau(t - t_0))} = \frac{l_0}{b_0}. \quad (22)$$

Як бачимо, зміна температури не впливає на значення безрозмірних елементів базису. В робочі рівняння (9) входять координати оптичних центрів 1 і 2 відбивачів. На практиці їх обчислюють за результатами вимірювань електронного тахеометра. Отже, якщо коефіцієнт q не залежить від зміни температури, а координати визначають незалежно, то температурне розтягування/стиснення не впливає на результати визначення координат точки полюса.

На рис. 12 показано визначення лінійних елементів на інтерферометрі із переміщеннями шістьма прийомами за допомогою давача-вектора, який ми розробили. Підставивши значення $m_{lin} = 0,01$ мм та $M_p = 0,05$ мм у формули (15), (19), доходимо висновку, що апіорна максимальна похибка визначення просторового положення вістря не повинна перевищувати 0,11 мм.

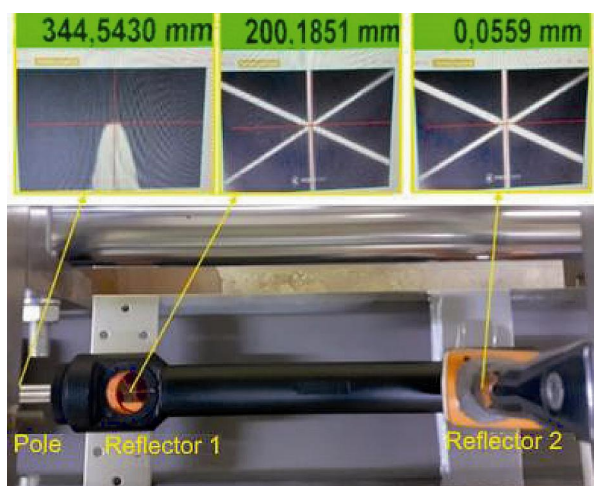


Рис. 12. Визначення лінійних елементів вектора та постійної поправки

Тепер потрібно визначити постійну поправку давача-вектора. Це виконано на лінійному базисі, який зафіксовано двома отворами завдовжки 9,9734 м та визначено інварним компарованим дротом. На одному кінці базису встановлено електронний тахеометр, на іншому – давач-вектор. У вертикальне положення давач-вектор встановлено точним 5' рівнем (рис. 13). Вимірюванням віддалей на два відбивачі ми визначили сталу поправку електронного тахеометра Leica, яка становила +17,2 мм.



Рис. 13. Визначення приладової поправки

Досліджуючи точність визначення просторового положення вістря давача-вектора, ми використали лінійний базис. На одному кінці базису встановили електронний тахеометр, а на іншому – давач-вектор (рис. 14). Давач-вектор не центрували, тобто він може займати довільне положення у просторі. Виконано шість вимірювань: у двох вимірюваннях давач-вектор був майже у вертикальному положенні, у чотирьох інших – нахилений приблизно на 30°. Для фіксування давача-вектора використано фотоштатив. Електронним тахеометром виміряли віддалі та кути на два відбивачі за двох положень круга.

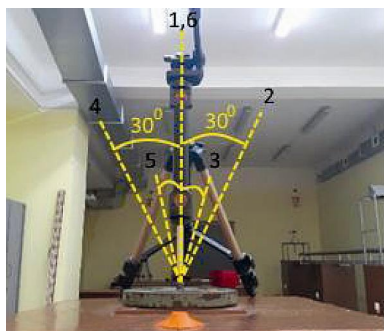


Рис. 14. Дослідження точності двопризмового вектора

За формулами (9) визначали координати вістря. Результати визначення центра, виконаного незалежно шість разів, подано у табл. 3.

Таблиця

Координати контрольної точки на різних установках двопризмового вектора

Кут нахилу Координата	X, м	Y, м	Z, м
0°	989,9910	501,4731	99,2958
30°	989,9911	501,4727	99,2964
30°	989,9909	501,4729	99,2957
30°	989,9914	501,4734	99,2958
30°	989,9910	501,4733	99,2961
0°	989,9909	501,4735	99,2960
Розмах, мм	0,5	0,8	0,7
СКП, мм	0,2	0,3	0,3

Оскільки діаметр отвору, що фіксує центр пункту лінійного базису, дорівнює близько 1 мм, то значення розмаху вимірів у табл. 3 різняться з-за цього впливу. Дослідимо точність визначення просторових координат давачем-вектором, застосовуючи кінцеву міру. У трьох положеннях у просторі на віддальх 6, 10 та 18 м від електронного тахеометра по черзі фіксували кінцеву міру. Фіксували вістря давача-вектора на початку та на кінці кінцевої міри (рис. 15). Електронним тахеометром вимірювали віддаль та кути на призмах давача за двох положень круга.



Рис. 15. Перевірка двопризмового вектора кінцевою мірою

За формулами (9) визначали координати вістря. Порівняння еталонної віддалі кінцевої міри та визначеної давачем-вектором подано у табл. 4.

Таблиця 4

Порівняння віддалей у просторі

№ вимірювання	Віддаль, виміряна давачем-вектором, мм	Еталонне значення віддалі, мм	Різниця, мм
1 (6 м)	1000,27	1000,004	0,27
2 (10 м)	1000,50	1000,004	0,50
3 (18 м)	1000,21	1000,004	0,21
Середнє	0,32		

Висновки

На підставі теоретичних напрацювань та практичної реалізації розробленого обладнання можна зробити такі висновки:

1. Оптимальна візирна ціль у вигляді плівкового відбивача забезпечує перпендикулярність вимірювального променя, чим підвищує точність візування та зменшує кількість станцій встановлення електронного тахеометра.

2. Розроблено оптимальну конструкцію сферичного відбивача, завдяки якому забезпечено високу точність візування електронним тахеометром. Застосовуючи такий відбивач, можна виконувати геодезичний контроль геометричних параметрів, наприклад, горизонтальності поверхні.

3. За допомогою розробленого давача-вектора та електронного тахеометра можна виконувати практично всі завдання геодезичного контролю із точністю до 0,5 мм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Баран П. Інженерна геодезія: монографія. Київ: ПАТ "Віпол", 2012. 618 с.

Бурак К. Технологія розпланувальних робіт і виконавчих знімань з використанням TPS. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. Вип. 75. С. 53–57. URL: <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-75-2011/technology-planning-works-and-executive-surveys-using>

Віват А., Літинський В., Літинський С. Точність визначення положення точок методом оберненої зачіпки. *Inowacyjne technologie geodezyjne*: міжнародна наукова конференція. Жешув, Польща, 10–12 червня 2015 р.

ДБН Б В.1.3-2: 2010. Система забезпечення точності геометричних параметрів у будівництві. Геодезичні роботи у будівництві. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25911

ДСТУ Б В.1.3-3:2011. Модульна координація розмірів у будівництві. Загальні положення. Настанова. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/5-1-0-1024>

ДСТУ-Н Б В.1.3-1:2009 Виконання вимірювань, розрахунок та контроль точності геометричних параметрів. Настанова. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25920

Костецька Я. М. Електронні геодезичні прилади. Львів: Престиж інформ, 2000. 324 с.

Літинський, В. Фис М., Покотило І., Літинський С. Розрахунок оптимальних значень вимірюваних віддалей для точного визначення довжин невеликих відрізків. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2014. Вип. 79. С. 42–47. URL: <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-79-2014/calculation-optimal-values-measured-lengths-accurate>

Літинський В., Віват А., Перій С., & Літинський С. Спосіб вимірювання взірцевого базиса 2-го розряду для еталонування електронних тахеометрів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. (81). С. 59–65. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2015.01.059>

Русинов М. М., et al. Вычислительная оптика: справочник. Ленинград: Машиностроение., 1984.

Спосіб визначення приладової поправки з використанням лазерного інтерферометра: пат. 120949 Україна: 2006. № а201706967; заявл. 03.07.2017; опубл. 10.03.2020.

Чиж І. Г., Тимчик Г. С., Шиша Т. О., Афончина Н. Б. Аберометрія оптичної системи ока людини. Київ: НТУУ КПІ, 2013. 292 с.

Bösemann, W. (2016). Industrial photogrammetry-accepted metrology tool or exotic niche. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41. URL: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-15-2016>

Leica TS30 White Paper [Електронний ресурс]. URL: https://www.gefosleica.cz/ftp/White_papers/Total_stations/Leica_TS30_White_Paper_0904_766425_en.pdf

Petrakov, Y., & Shuplietsov, D. (2018). Accuracy control of contour milling on CNC machines. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.132223>

Vivat, A., Tserklevych, A., & Smirnova, O. (2018). A study of devices used for geometric parameter measurement of engineering building construction. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 87, 21–29. URL: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2018.01.021>

Vivat, A., Petrov, S., Volkova, V. (2022). Development methods of large-equipment installation in design position using electronic total stations. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 95, 22–30. URL: <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes>

and-issues/volume-95-2022/development-methods-large-equipment-installation
Zobrist, T. L., Burge, J. H., & Martin, H. M. (2009, August). Laser tracker surface measurements of the

8.4 m GMT primary mirror segment. In *Optical Manufacturing and Testing VIII*, Vol. 7426, p. 742613. International Society for Optics and Photonics. URL: <https://doi.org/10.1117/12.826706>

Anatolii TSERKLEVYCH¹, Anatolii VIVAT², Oleksandr ZAYATS³, Sergii PETROV⁴

Department of Engineering geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: anatolii.y.vivat@lpnu.ua, serhii.l.petrov@lpnu.ua, ¹ <https://orcid.org/0000-0002-8398-3860>, ² <https://orcid.org/0000-0002-6114-5911>, ³ <https://orcid.org/0000-0002-5482-0413>

ENGINEERING SOLUTIONS FOR INCREASING THE ACCURACY OF GEODESIC MEASUREMENTS BY TOTAL STATIONS

The developments of the scientific and pedagogical staff of the Department of Engineering Geodesy of the Lviv Polytechnic National University in the direction of increasing the accuracy of geodetic measurements in the construction, operation and repair of unique buildings, structures or separate technological equipment, which is particularly important for their safe operation, are considered. Auxiliary equipment (improved light-reflecting mark, device for linear-angular measurements, spherical reflector with a stand, two-prism transducer-vector) has been developed to increase the accuracy of measurements of parameters of engineering structures by electronic total stations. On the basis of theoretical calculations, an optimal image of the geodetic mark for viewing at different distances is proposed, and a three-dimensional holder is developed to compensate for the non-perpendicular error. A technique was developed and implemented in a device for linear-angular measurements, which made it possible to determine the length of segments from 1 to 30 meters with an accuracy of 0.1–0.3 mm. In order to transfer the coordinates of the geodetic base from the reference network to the measurement points of building structures, a spherical reflector and a stand were developed, in the process of using which errors in centering, reduction and height measurement are compensated. The application of the developed spherical reflector was tested during the restoration of the design position of the large-sized equipment of the power complex facility with an accuracy of 0.5 mm. To determine the dimensions of irregularly shaped structures in order to minimize the angles of the prism (to directly determine the coordinates of the prism tip), a two-prism encoder vector was theoretically justified and developed. The accuracy of determining the spatial coordinates by the vector encoder was investigated using the final measure as a reference value. According to the results of research, the deviation of the distances determined with the help of the vector transducer from the reference value is 0.3 mm.

Key words: reflective mark; device for linear and angular measurements; spherical reflector; dual-prism vector; spatial method of electronic total station; increasing the accuracy of measurements by electronic total stations.

Надійшла 03.11.2022 р.