



## ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНИХ ТРЕКЕРІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПОБУДОВИ ЛОКАЛЬНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

*Изложена и обоснована методика исследования геометрических параметров и метрологических характеристик лазерных трекеров по результатам измерений в локальной инженерно-геодезической сети. Доказано возможность достижения высоких показателей точности построения таких сетей в сравнении с сетями, созданными обычными геодезическими приборами.*

*Methodology of the research of geometrical parameters and metrological descriptions of laser trackers based on the results of measurements in a local engineering-geodetic network is described and grounded. Possible obtaining of high accuracy during construction of such networks in comparison with networks constructed using common geodetic instruments is argued.*

**Постановка проблеми.** Поява високоточних координатно-вимірювальних приладів, таких як лазерні трекери, змушує до вдосконалення методики їх досліджень. Разом з тим зросли вимоги до точності монтажу різноманітного обладнання та визначення геометричних параметрів великогабаритних виробів. Ці обставини і зумовили наше дослідження можливостей використання для цього лазерних трекерів. Завдання вирішене із застосуванням локальних інженерно-геодезичних мереж. Вважаємо його актуальним.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються даної проблеми.** Світові організації та дослідницькі лабораторії пропонують різні методи і засоби метрологічних досліджень лазерних трекерів, які базуються в основному на використанні дорогого еталонного обладнання. Окремі з них, наприклад дослідники Національної фізичної лабораторії (NPL) Великої Британії [2-4], запропонували метод визначення геометричних параметрів та метрологічних характеристик трекерів на базі лінійно-кутової мережі.

Метод визначення середньої квадратичної похибки (СКП) вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером Leica Absolute Tracker AT401 використали в лабораторії SLAC (США) [1]. Мережа складалася з 10-ти пунктів, які розташовувалися на висоті головки приладу. Вимірювання виконували тільки в одному положенні через кожні 30° повороту приладу.

**Постановка завдання:** розробити власну методику дослідження геометричних параметрів та метрологічних характеристик лазерних трекерів на основі використання результатів побудови локальної геодезичної мережі та дослідити точність такої побудови для потреб інженерної геодезії.

**Основний зміст роботи.** У ході метрологічної атестації та перевірки лазерних трекерів визначають або контролюють такі їх метрологічні характеристики: СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів; СКП вимірювання віддалі. Крім цього, визначають і геометричні параметри: для горизонтального круга – неперпендикулярність візирної осі відносно осі обертання труби (колімаційна похибка) та неперпендикулярність осі обер-

тання труби щодо осі обертання приладу; для вертикального круга – місце зеніту та його зміну залежно від вимірюваної зенітної відстані.

Для вирішення поставлених завдань у лабораторії ДП "Укрметртестстандарт" було створено геодезичну мережу з 23-х пунктів, розташованих довільно в межах діапазону вимірювань лазерним трекером. Геодезична мережа складалася з пунктів у вигляді кілець, виготовлених за аналогією до цільового "гнізда" для сферичного відбивача, що входить у комплект до трекера (мал. 1). Дванадцять пунктів розташували довільно на підлозі, три звичайні (мал. 2) і вісім спеціальних пунктів – уздовж стіни на різній висоті (мал. 3). Трекером виконували вимірювання на кожен пункт у двох його положеннях: фронтальному й тильному послідовно з трьох довільних станцій (прилад не має центрира).



Мал. 1. Загальний вигляд локальної інженерно-геодезичної мережі

Програмним забезпеченням трекера, наприклад програмою SAM2 Measure, передбачено можливість прив'язки приладу в ході вимірювань методом зворотної засічки у потрібну систему координат за відомими просторовими координатами мінімум трьох пунктів. Точність прив'язки залежить від вибору цих пунктів, їх взаємного розташування та геометрії. Після успішної прив'язки трекера вимірювання на всі пункти повторюються з трьох вільних станцій, рівномірно розміщених у межах геодезичної мережі (мал. 4).



При дослідженні використовувався лазерний трекер Faro ION, СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів яким становить  $(10+2,5 \cdot L(\text{м}))$  мкм, а



Мал. 2. Звичайні пункти в локальній інженерно-геодезичній мережі



Мал. 3. Спеціальний пункт мережі

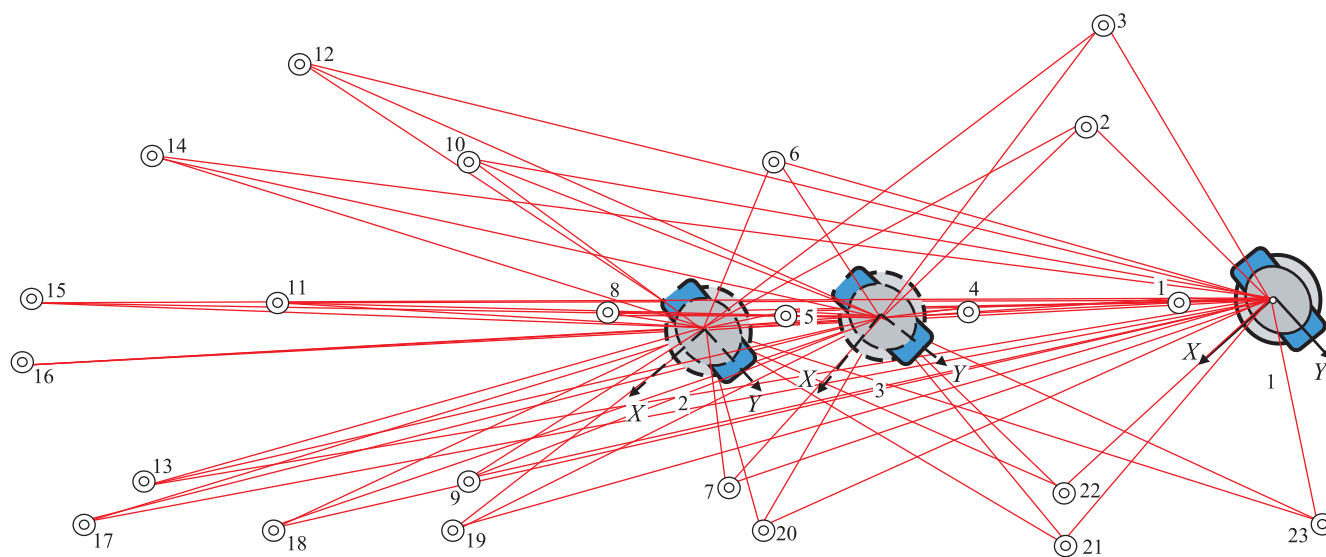
віддалі в режимі ADM –  $(8 + 0,4 \cdot L(\text{м}))$  мкм [6]. Похибка, виражена в лінійній мірі, являє собою похибку в напрямку, перпендикулярному до напрямку візування. Так її легше порівнювати з похибкою вимірювання віддалі. З формули, за якою нормована СКП вимірювань кута, бачимо, що коли її перевести у кутову міру, то вона зменшується зі збільшенням віддалі до відбивача від 1,5" до 0,6" у діапазоні віддалей від 2 до 20 м.

Результатами вимірювань трекером на кожній станції можуть бути координати пунктів мережі в локальній системі координат станції. Трекер не показує виміряні горизонтальні напрямки, вертикальні кути та відстані. При побудові геодезичної мережі за методикою, яка поставляється разом з трекером, координати пунктів, визначені з першої станції, приймаються за вихідні. Для одержання координат наступних пунктів і точок на об'єкті вимірювань в єдиній системі координат вирішується задача просторової зворотної засічки на пункти з уже відомими координатами. З точки зору класичного підходу до побудови геодезичних мереж такий підхід не можна вважати задовільним тому, що похибки, одержані на першій станції, передаються на другу, третю і т. д. Так похибки накопичуються і не усереднюються за методом найменших квадратів для всієї мережі, а тільки локально при вирішенні зворотної засічки для станції стояння.

Лазерний трекер виконує вимірювання у сферичній системі координат, але він видає результати зразу в прямокутній просторовій системі координат. Тому для вирівнювання локальної лінійно-кутової мережі для всіх координат, одержаних у ході вимірювань, потрібно вирішити обернену геодезичну задачу (щоб мати результати у сферичній системі координат) за відомими формулами:

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2}; \quad z_i = \arccos\left(\frac{Z_i}{D_i}\right),$$

$$\alpha_i = \arctg\left(\frac{Y_i}{X_i}\right), \quad (1)$$



Мал. 4. Схема локальної інженерно-геодезичної мережі



де  $X_i, Y_i, Z_i$  – визначені з вимірювань координати сферичного відбивача при його знаходженні на пункті з номером  $i$ ;  $D_i, z_i, \alpha_i$  – виміряна віддаль, зенітна відстань і дирекційний кут з центра трекера на центр сферичного відбивача при його знаходженні на пункті з номером  $i$ .

Трекером виконують вимірювання дирекційного кута проти ходу годинникової стрілки, тому горизонтальний напрям  $\beta_i$  на центр сферичного відбивача при його знаходженні на пункті з номером  $i$  обчислюємо за формулою

$$\beta_i = 360^\circ - \alpha_i. \quad (2)$$

Отримані віддалі, зенітні відстані та горизонтальні напрями вводимо у програму АРМИГ [5]. Виконавши вирівнювання окремо горизонтальної та вертикальної (тригонометричне нівелювання) мережі за цією програмою, визначаємо метрологічні характеристики трекера. Ними є СКП вимірювання віддалей та горизонтальних напрямів для горизонтальної мережі й перевищень і зенітних відстаней – для вертикальної. Так само одержуємо точнісні характеристики локальної інженерно-геодезичної мережі, необхідні для побудови таких мереж у виробничих умовах.

При вирівнюванні у першому наближенні за вихідні приймалися координати всіх точок, одержані з першої станції. Це потрібно було для визначення наближених координат усіх станцій та аналізу на наявність грубих помилок. Для мережі, зображеної на мал. 4, були відбраковані всі вимірювання на пункт 3, оскільки, як виявилось, він закріплений на хиткій, а тому ненадійній основі.

У другому наближенні за вихідні приймалися координати першої станції стояння і найбільш віддаленого від неї одного або декількох пунктів (у нашому випадку – 5, 12 та 23). Для одержання прийняттого результату при вирівнюванні в меню програми "Режими" було збільшено кількість ітерацій до 7-8, через те що в цій мережі наявні дуже гострі засічки. При виконанні наближень координати, одержані в попередньому наближенні, використовувалися для обчислення коефіцієнтів і вільних членів рівнянь поправок наступного наближення.

За результатами вирівнювання вимірів, виконаних лазерним трекером FARO ION у горизонтальній геодезичній мережі, зображеній на мал. 4, програмою АРМИГ одержано СКП вимірювання горизонтальних напрямів в 1,3" і віддалей 6 мкм. До вирівнювання окремо залучалися дані вимірювань, одержані при фронтальному й тильному положеннях приладу, тобто за аналогією з геодезичними мережами для вимірювань, виконаних півприйомом.

Оскільки алгоритм програми АРМИГ для оцінювання точності вимірювань ґрунтується на обчисленні співвідношення точності кутових та лінійних вимірювань, було застосовано формулу для незалежного оцінювання точності цих вимірювань

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-k}} \quad (3)$$

де  $v_i$  – поправка до виміряного значення горизонтального напрямку або віддалі одержана з вирівнювання;  $n$  – кількість виміряних трекером горизонтальних напрямків або відстаней;  $k$  – кількість невідомих, які визначаються при вирівнюванні.

СКП вимірювання горизонтальних напрямів і віддалей, обчислена за цією формулою, склала відповідно 1,5" і 6,5 мкм.

Для визначення СКП вимірювання зенітних відстаней виконувалось вирівнювання програмою АРМИГ вертикальної геодезичної мережі (тригонометричного нівелювання). За вихідну приймалася умовна висота першої станції стояння. Перед вирівнюванням у меню програми "Режими" обиралися ваги виміряних перевищень, обернено пропорційних відстаням від трекера до пунктів мережі.

У результаті вирівнювання отримано поправки до кожного з перевищень.

Для того щоб від поправок в обчисленні перевищень перейти до поправок у виміряні зенітні відстані, а потім обчислити СКП вимірювання зенітних відстаней, необхідно було розрахувати за поправками до виміряних перевищень поправки до зенітних відстаней у кутовій мірі за формулою

$$v_{h_i}'' = \frac{v_{h_i} \cdot \sin z_i}{D_i} \rho'', \quad (4)$$

де  $v_{h_i}$  – поправка до виміряного перевищення, одержана з вирівнювання та виражена в мікрометрах;  $D_i$  – нахилена віддаль від трекера до пункту мережі, виражена в мікрометрах;  $\rho'' = 206265''$  – значення радіана в секундах.

За формулою (3) було знайдено СКП вимірювання перевищень та зенітних відстаней, які становили відповідно 30 мкм та 0,8".

Просторові координати і їх СКП, отримані з вирівнювання горизонтальної та вертикальної геодезичної мережі за програмою АРМИГ, наведено в табл. 1.

За обчисленими даними про горизонтальні напрямки та зенітні відстані було знайдено геометричні параметри трекера – колімаційна похибка  $c_i$  та місце зеніту  $Mz_i$  за формулами

$$c_i = 0,5(\beta_i^{FS} - \beta_i^{BS}); \quad Mz_i = 0,5(z_i^{FS} - z_i^{BS}), \quad (5)$$

де  $\beta_i^{FS}$  і  $\beta_i^{BS}$  – горизонтальні напрямки, виміряні лазерним трекером при фронтальному і тильному положеннях приладу;  $z_i^{FS}$  і  $z_i^{BS}$  – зенітні відстані, виміряні трекером при тих самих положеннях приладу.

Результати розрахунків колімаційної похибки та місця зеніту, сепаровані за зменшенням виміряної зенітної відстані для кожної зі станцій стояння, а також їхні середні значення та СКП наведено в табл. 2.

З цієї таблиці видно, що не простежується чіткої залежності значень колімаційної похибки та місця зеніту від зенітної відстані, а це свідчить про відсутність значимої неперпендикулярності осі обертання труби відносно осі обертання приладу. СКП вимірювань, що виникли внаслідок коливань колімаційної похибки та місця зеніту, значно кращі, ніж добуті в результаті зрівнювання геодезичної мережі, оскільки вони характеризують тільки випадкову частину похибки.



Таблиця 1. Результати вирівнювання локальної геодезичної мережі за програмою АРМИГ

<i>i</i>	$X_i$ , мм	$Y_i$ , мм	$Z_i$ , мм	СКП $X_i$ , мкм	СКП $Y_i$ , мкм	СКП $Z_i$ , мкм
1	1386,784	0,008	-1190,322	3,6	11,1	8,8
2	2600,818	384,555	-901,293	3,9	11,3	9,3
4	4452,259	-432,171	-1182,316	3,5	9,2	9,1
5	-	-	-1175,508	-	-	8,7
6	7465,007	-236,064	-1172,022	3,6	6,8	8,8
7	7308,729	-1466,222	-1176,056	3,8	6,7	8,9
8	9991,504	-1002,718	-1173,822	3,5	9,5	9,6
9	13238,341	-2189,524	-1158,595	5,7	21,3	12,5
10	13440,034	-936,559	-1158,115	3,5	22,2	12,6
11	16610,884	-1930,685	-1154,388	5,3	33,8	14,7
12	-	-	558,995	-	-	15,2
13	19147,294	-2910,795	-1146,092	8	42,1	16,3
14	19295,932	-1673,218	-1141,625	4,8	42,9	16,3
15	21998,102	-2580,601	-1141,687	7,2	52,3	17,7
16	23491,383	-3081,390	65,850	8,6	57,1	18,5
17	19157,326	-2870,814	-488,734	7,9	42,1	16,3
18	17594,593	-2678,204	792,257	7,2	36,8	15,4
19	13001,123	-2113,700	625,854	5,5	20,5	12,3
20	7300,401	-1424,416	571,375	3,7	6,7	8,5
21	2799,383	-883,028	768,326	3,5	11,6	9,4
22	2822,767	-884,419	-446,940	3,5	11,6	9,3
23	-	-	272,294	-	-	11,4
ST1FS	0,0129	0,0105	-	2,5	11,8	-
ST1BS	0,0161	0,0113	0,0107	2,5	11,8	7,9
ST2FS	8668,4505	-924,7651	0,0181	2,3	6,4	7,4
ST2BS	8668,4505	-924,7601	0,0272	2,3	6,4	7,4
ST3FS	5898,8254	-639,5118	0,0115	2,3	6,2	7,3
ST3BS	5898,8251	-639,5030	0,0178	2,3	6,2	7,3

Таблиця 2. Результати обчислення колімаційної похибки  $c_i$  і місця зеніту  $M_{Z_i}$  залежно від вимірної зенітної відстані

Станція стояння								
Зенітна відстань, град.	1		2			3		
	$c_i$ , сек.	$M_{Z_i}$ , сек.	Зенітна відстань, град.	$c_i$ , сек.	$M_{Z_i}$ , сек.	Зенітна відстань, град.	$c_i$ , сек.	$M_{Z_i}$ , сек.
130	2,6	0,9	131	1,3	-0,4	128	1,2	0,8
108	2,3	-0,1	131	1,9	0,3	128	2,5	0,5
104	2,4	0,1	130	1,8	-0,2	125	2,9	0,5
99	2,6	-0,1	128	1,2	-0,2	125	2,4	0,3
98	2,8	-0,3	105	1,9	-0,2	105	2,6	-0,4
98	2,6	-0,3	103	1,8	-0,1	104	1,5	-0,2
98	2,2	0,7	103	2,5	-0,7	104	1,7	-0,1
96	2,8	-0,2	99	2,0	0,4	98	2,7	0,1
94	2,5	-0,5	98	2,0	-0,2	98	2,7	-0,4
94	2,6	-0,9	98	2,5	-0,5	98	1,3	0,3
94	2,6	-0,9	96	2,4	-0,2	96	2,7	-0,6
93	2,7	-0,5	96	2,4	-0,4	94	2,5	-0,7
93	2,5	-0,4	94	2,5	-0,9	94	2,7	-0,6
93	2,2	-0,5	94	2,0	-0,1	94	2,4	-0,7
92	2,2	-0,2	92	2,3	-0,4	92	2,4	-0,5
91	2,2	-0,6	89	2,3	-0,4	89	2,3	-0,4
89	2,5	-0,4	88	1,9	-0,5	88	2,0	-0,5
88	2,3	0,0	86	2,0	-0,2	87	2,2	-0,4
87	2,2	-0,3	85	2,1	-0,6	86	2,4	-0,2
85	2,1	-0,2	82	1,8	-0,6	85	2,0	-0,2
85	1,1	0,4	82	1,6	-0,1	76	0,6	0,2
75	1,6	0,0	81	2,8	0,2	75	1,4	-0,1
71	1,4	0,0	68	0,1	0,9	70	1,0	0,2
Середнє значення	2,3	-0,2	Середнє значення	2,0	-0,2	Середнє значення	2,1	-0,1
СКП	0,4	0,4	СКП	0,6	0,4	СКП	0,6	0,4

**Висновки.** З нашого дослідження випливають такі висновки:

1. Запропонована методика дозволяє дослідити геометричні параметри і метрологічні характеристики лазерного трека на всьому робочому діапазоні вимірювань без застосування дорогого калібрувального обладнання.

2. СКП вимірювання горизонтальних напрямів і віддалей лазерним трекером Faro ION становить відповідно 1,5" і 6,5 мкм у діапазоні вимірювань від 2 до 22 м при одному положенні трека (у півприйому).

3. СКП вимірювання перевищень та відповідних зенітних відстаней у цьому ж діапазоні становить 30 мкм та 0,8" при одному положенні трека.

4. СКП вимірювань, одержані з вирівнювання мережі, в цілому відповідають значенням, нормованим фірмою-виробником.

5. СКП визначення положення пунктів мережі, створеної лазерним трекером, у горизонтальній площині становить від 3,5 до 8,6 мкм (координата X), від 6,7 до 57 мкм (координата Y), а у вертикальній площині – від 8,8 до 18,5 мкм, що значно менше СКП визначення положення пунктів аналогічних мереж, створених за допомогою електронного тахеометра, а в вертикальній площині – високоточного нівеліра та комплексу інварних рейок.

**Перспективи подальших досліджень.** Необхідно виконати дослідження точності побудови лазерним трекером локальних інженерно-геодезичних мереж різної геометричної форми шляхом математичного моделювання. Слід розробити методику та дослідити точність прив'язки електронного тахеометра до локальної інженерно-геодезичної мережі, створеної за допомогою трека.

**Література**

1. Gassner, G. Instrument tests with the new Leica AT401 / G. Gassner, R. Ruland // Presented at 11th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 2010), DESY, Hamburg, Germany, 13-17 September, 2010.  
 2. Hughes, B. Laser tracker error determination using a network measurement / B. Hughes, W. Sun, A. Forbes [et al.] // Journal of the Coordinate Metrology Society. – 2010.–Vol. 5(2). – P. 26-32.  
 3. Lewis, A. Determination of misalignment and angular scale errors of a laser tracker using a new geometric model and a multi-target network approach / A. Lewis, B. Hughes, A. Forbes [et al.] // MacroScale 2011 Conference, Switzerland, 2011.  
 4. Sandwith, S. Large Volume Metrology Conference / S. Sandwith, R. Lott. – LVMC. Chester, UK, 2007.

**Інтернет-джерела**

5. Беляев, В.А. Пакет прикладних програм. Автоматизированное рабочее место инженера-геодезиста (АРМИГ): Инструкция / В.А. Беляев. – Реж. доступу: www.armig.org  
 6. FARO Technologies Inc. – Реж. доступу: www.faro.com

Надішла 15.08.13