



## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНОГО КРУГА ЛАЗЕРНИХ ТРЕКЕРІВ НА ЕТАЛОНІ ПРЯМОЛІНІЙНОСТІ

*Предлагается и обосновывается методика определения СКП измерения вертикальных углов лазерными трекерами по результатам измерений при выявлении геометрической формы рабочей поверхности эталона прямолинейности ВЕТУ 01-02-01-98.*

*It is proposed and grounded a method of determination of mean square errors of vertical angles measuring with laser trackers on the basis of measurements for determining the geometric shape of working surface of a secondary standard of straightforwardsness (VETU 01-02-01-98).*

**Постановка проблеми.** Однією з основних метрологічних характеристик, яку необхідно визначати в ході державної метрологічної атестації і повірки лазерних трекерів, є середня квадратична похибка (СКП) вимірювання вертикальних кутів.

На сьогодні маємо істотні відмінності у методах і засобах метрологічних досліджень лазерних трекерів, що їх пропонують різні закордонні організації та дослідницькі лабораторії. Враховуючи постійно зростаючі вимоги до точності виготовлення деталей у промисловості й безперервне підвищення точності лазерних трекерів, необхідно розробити такі методи дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів трекерами, точність яких відповідала б сучасним вимогам. Це завдання актуальне і для України.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються даної проблеми.** Відомо немало методів контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів фірмами-виробниками. Вони призначаються для забезпечення випуску приладів і в основному базуються на дорогому устаткуванні, розробленому саме для таких цілей. Означені в нормативно-методичних документах [3-5] методи і засоби досліджень реалізують на практиці за допомогою еталонних мір довжини, які орієнтовані більше на загальне оцінювання СКП вимірювання вертикальних кутів трекерами у вузькому діапазоні. В описаному в праці [6] методі використано інтерферометр та каретку з відбивачем, яка рухається по колії. У Росії такі дослідження теж виконують із застосуванням інтерферометра і також у вузькому діапазоні [2]. Вимірювання виконують трекером на вертикальну еталонну двометрову міру довжини.

**Постановка завдання:** розробити методику дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів лазерним трекером на вторинному еталоні одиниці довжини в області відхилень від прямолінійності та площинності ВЕТУ 01-02-01-98 (далі – еталона прямолінійності).

**Основний зміст роботи.** Як високотехнологічний мобільний координатно-вимірювальний прилад лазерний трекер призначений в основному для виявлення геометричної форми складних поверхонь.

Для вирішення поставленого завдання автори застосували еталон прямолінійності ВЕТУ 01-02-01-98, що належить київському ДП "Укрметрестандарт" (мал. 1).

До складу еталона входять:

- гранітний міст розмірами 300 × 80 × 40 см;
- два автоколіматори типу АК-02У, що нерухомо закріплені на кінцях моста (границі абсолютної похибки вимірювання ними вертикальних та горизонтальних кутів становлять ± 0,2");
- рухома каретка з двома дзеркалами, опорні ролики якої контактують з досліджуваною робочою поверхнею моста.



Мал. 1. Загальний вигляд еталона прямолінійності ВЕТУ 01-02-01-98

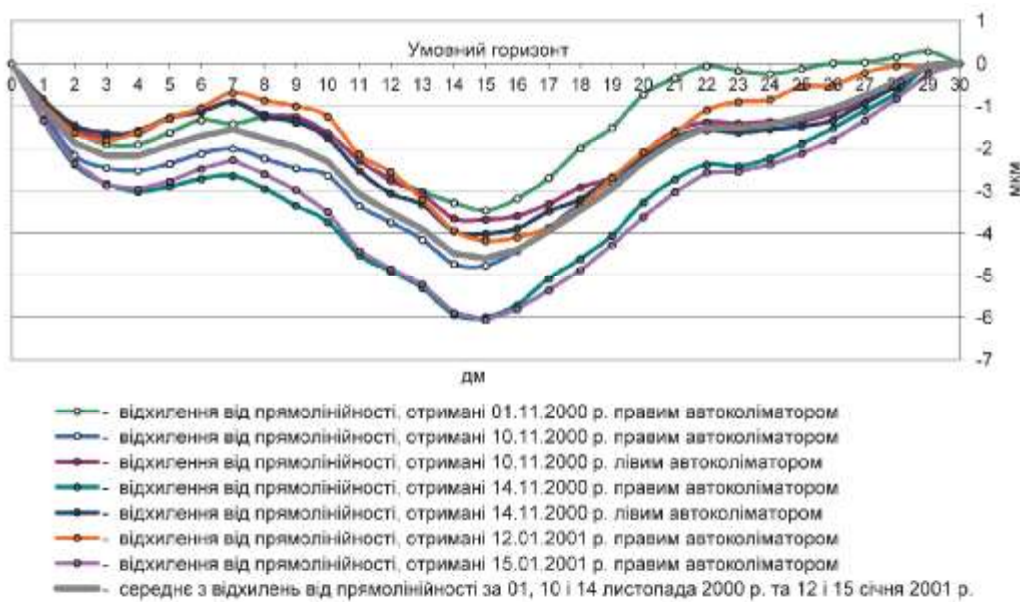
Робочу поверхню еталона прямолінійності неодноразово досліджували інженери ДП "Укрметрестандарт". Методика досліджень ґрунтується на застосуванні двох автоколіматорів, якими виконують вимірювання на рухому каретку еталона.

Каретка переміщується прямолінійно на відстань 3 м від 0-ї до 30-ї точки, після чого вона повертається з тим же кроком у вихідне положення. В процесі досліджень еталона виконується по три цикли спостережень: за двома автоколіматорами і тільки за правим.

За результатами спостережень кожним автоколіматором розраховувались відхилення  $H_i$  точок профілю поздовжнього перетину робочої поверхні моста від прямої, що з'єднує крайні точки. За одержаними значеннями будувалися графіки відхилень від прямолінійності для кожного з автоколіматорів (мал. 2).

Середнє квадратичне відхилення  $m(H_i)$  одиничних результатів вимірювань, середнього з них  $m(\bar{H}_i)$  та довірчі границі  $\epsilon$  випадкової похибки визначалися відповідно до норм документа [1].

Границі довірчої абсолютної похибки визначення



Мал. 2. Графіки відхилень від прямолінійності робочої поверхні моста ВЕТУ 01-02-01-98

відхилення еталона від прямолінійності становили максимум  $\pm 0,83$  мкм при довірчій імовірності 0,95. Найбільші температурні деформації було зафіксовано в середній частині моста, але вони не виходили за межі  $\pm 1,5$  мкм. Якщо перевести їх у кутову міру, то це буде  $\pm 0,2''$ .

На підставі вищесказаного можна зробити висновок, що робоча поверхня моста ВЕТУ 01-02-01-98 є еталонною для дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів лазерним трекером.

Методика відпрацьовувалась при дослідженні лазерного трекера Faro ION, СКП вимірювання вертикальних кутів яким становить  $(10+2,5 \cdot L(\text{м}))$  мкм [7]. СКП виражена в лінійній мірі та являє собою похибку в напрямку, перпендикулярному до напрямку візування. Так її легше порівнювати з похибкою вимірювання віддалі. З формули, за якою нормували СКП вимірювань кута, випливає: якщо СКП перевести у кутову міру, то вона зменшується зі збільшенням віддалі до відбивача. З певної відстані нормована СКП кутових вимірювань становить  $2''$ .

Трекер, як і будь-який інший геодезичний кутомірний прилад, має обмежений діапазон вимірювання вертикальних кутів (мал. 3). В залежності від розташування сферичного відбивача при вимірюваннях (вище або нижче зорієнтованої уявної осі X) координати Z матимуть додатний або від'ємний знак.

Дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів у всьому робочому діапазоні лазерним трекером за допомогою еталона прямолінійності виконувалось у два етапи:

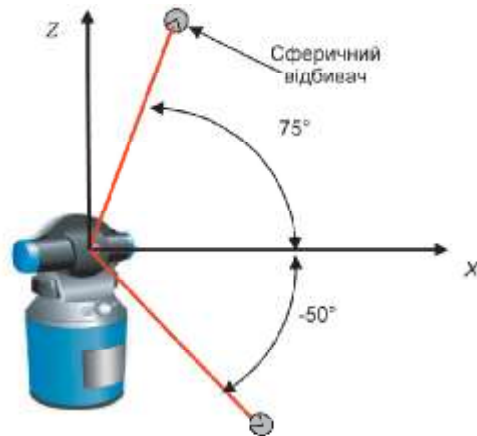
- у нижній частині діапазону (від 0 до мінус  $50^\circ$ ).
- у верхній частині діапазону (від 0 до  $75^\circ$ ).

На першому етапі дослідження трекер встановлювався на еталоні, як це показано на мал. 4, і його приводили в робоче положення. Після цього сферичний відбивач на підставці встановлювався на середині еталона на відмітці 0,2 м. Трекером виконували

вимірювання на відбивач у двох положеннях з кроком 0,1 м до відмітки 3 м.

До речі, трекером можна вимірювати у двох положеннях за командою оператора: у фронтальному (front-sight) і тильному (back-sight) положеннях. Зміна положень здійснюється автоматично обертанням на  $180^\circ$  навколо вертикальної та горизонтальної осей (аналогічно зміні положення круга при зніманні теодолітом або тахеометром).

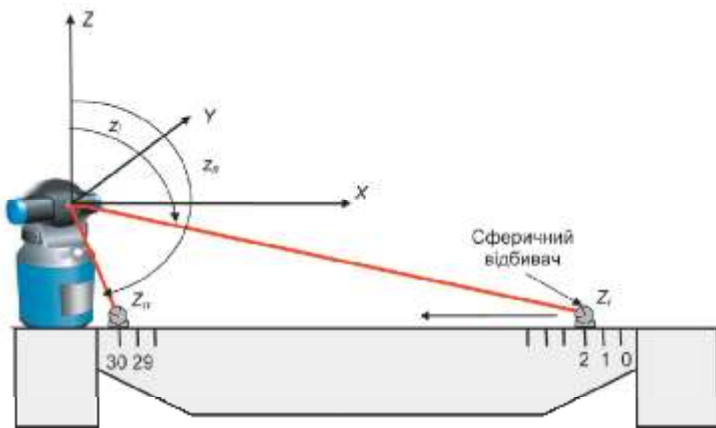
Схему вимірювань при дослідженні СКП вимірювання вертикальних кутів у нижній частині діапазону відображено на мал. 5.



Мал. 3. Діапазон вимірювання вертикальних кутів лазерним трекером Faro ION

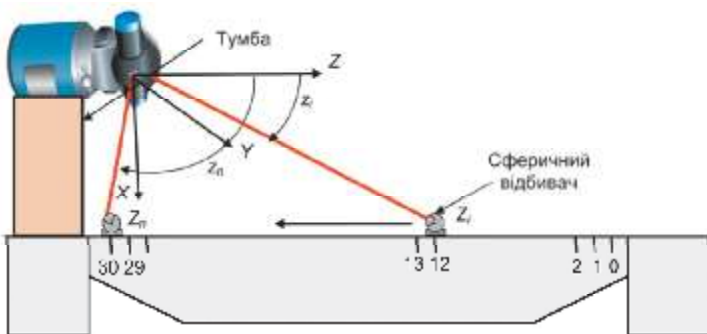


Мал. 4. Дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів у нижній частині діапазону вимірювань цим самим трекером



Мал. 5. Схема дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів у нижній частині діапазону

Процес дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів у верхній частині діапазону схематично передає мал. 6. При висоті підставки 0,5 м трекером виконують вимірювання у 18-ти позиціях сферичного відбивача на робочій поверхні еталона прямолінійності, чого цілком достатньо для визначення СКП вимірювання вертикальних кутів.



Мал. 6. Схема дослідження СКП вимірювання вертикальних кутів у верхній частині діапазону

Через те що трекер видає інформацію про вимірювання в координатах заданої і зорієнтованої системи, відхилення (перевищення)  $i$ -ї позиції відносно  $n$ -ї (останньої) сферичного відбивача на поверхні еталона  $H_{i-n}^{TP}$  обчислювали за формулою

$$H_{i-n}^{TP} = Z_i - Z_n,$$

де  $Z_i$  – координата  $i$ -ї позиції сферичного відбивача на поверхні еталона, виміряна лазерним трекером;  $Z_n$  – координата  $n$ -ї (останньої) позиції.

Оскільки ми досліджували спочатку СКП вимірювання вертикальних кутів у нижній частині діапазону (від 0 до мінус 50°), то координатами  $Z_i$  зі знаком "мінус", при обчисленнях було знехтувано.

Відхилення (перевищення)  $i$ -ї позиції сферичного відбивача на поверхні еталона  $H_i^{TP}$  обчислювали за формулою

$$H_i^{TP} = H_{i-n}^{TP} - \frac{H_{1-n}^{TP}}{S_{1-n}} \cdot S_{i-n},$$

де  $H_{i-n}^{TP}$  – перевищення  $i$ -ї позиції над останньою;  $S_{1-n}$  та  $S_{i-n}$  – відстані відповідно між 1-ю та  $n$ -ю,  $i$ -ю та  $n$ -ю позиціями сферичного відбивача відносно відміток на поверхні еталона.

Абсолютну похибку визначення трекером відхилення від прямолінійності в  $i$ -х точках (відносно відміток), де встановлювався сферичний відбивач на поверхні еталона  $\Delta_{H_i^{TP}}$ , одержали із формули

$$\Delta_{H_i^{TP}} = H_i^{TP} - \bar{H}_i,$$

де  $\bar{H}_i$  – еталонні відхилення від прямолінійності в  $i$ -х точках еталона за звітом про його дослідження.

СКП відтворення трекером поверхні, близької до площини, визначали за формулою

$$m_{\Delta_{H_i^{TP}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{H_i^{TP}}^2}{n}},$$

де  $n$  – кількість абсолютних похибок у точках з номером  $i$ , де встановлювався сферичний відбивач на поверхні еталона.

Для одержання СКП вимірювань вертикальних кутів трекером користувалися відомими простими формулами:

$$S_i^{TP} = S_{i-n} + S_0; \quad \Delta\beta_i^{TP} = \frac{m_{\Delta_{H_i^{TP}}}}{S_i^{TP}} \cdot \rho,$$

де  $\rho = 206265''$  – значення радіан у секундах;  $S_0 = 0,375$  м – відстань від трекера до відмітки  $n$ .

Відхилення від прямолінійності робочої поверхні моста визначали лазерним трекером у двох його положеннях, вказаних у таблиці та графічно на мал. 7.

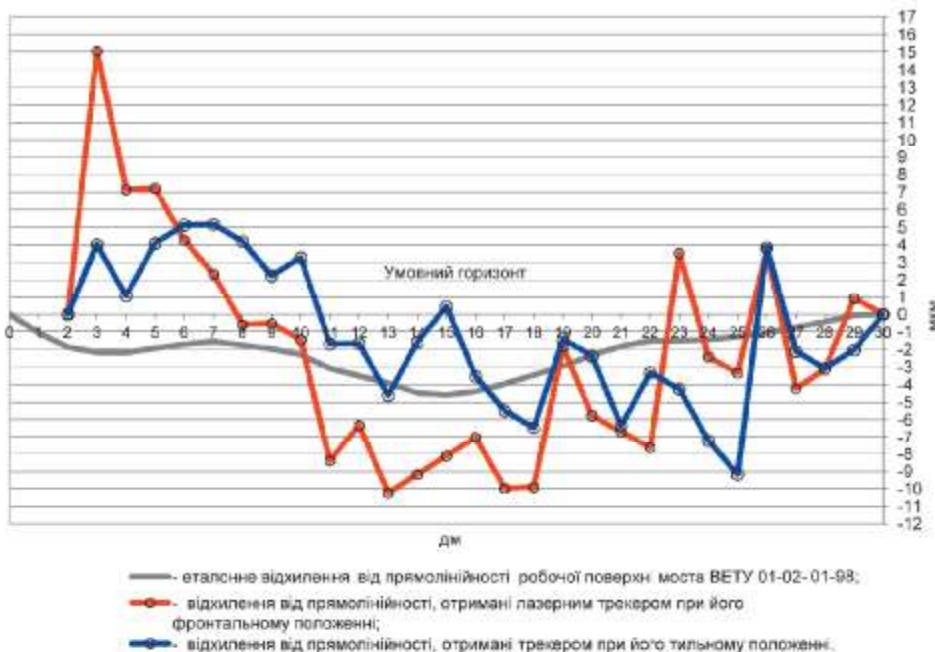
**Висновки.** 1. Запропонована методика дозволяє дослідити СКП вимірювання вертикальних кутів лазерним трекером в усьому робочому діапазоні вимірювань. 2. СКП вимірювань відхилень від прямолінійності лазерним трекером у діапазоні вимірювань до 3 м не перевищує 4-6 мкм окремо у фронтальному і тильному положеннях. 3. СКП вимірювання вертикальних кутів лазерним трекером становить 0,6'' окремо у фронтальному і тильному положеннях, що втричі перевищує точність, заявлену фірмою-виробником.

**Перспективи подальших досліджень.** Необхідно виконати аналогічні дослідження СКП вимірювання лазерними трекерами вертикальних кутів у верхній частині діапазону вимірювань (від 0 до 75°). Для цього слід виготовити відповідний постамент, на якому можна розмістити трекер так, як показано на мал. 6. Варто також дослідити СКП вимірювання вертикальних кутів високоточними тахеометрами, використовуючи сферичний відбивач від трекера.



Результати вимірювань при дослідженні еталона прямолінійності лазерним трекером окремо у фронтальному й тильному положеннях

Позиція, м	i	Положення				S <sub>i-n</sub> , м	H <sub>i</sub> , МКМ	Положення			
		Фронт.	Тильне	Фронт.	Тильне			Фронт.	Тильне	Фронт.	Тильне
		H <sub>i<sup>Фр</sup></sub> , мм	H <sub>i<sup>Тл</sup></sub> , мм	H <sub>i<sup>Фр</sup></sub> , МКМ	H <sub>i<sup>Тл</sup></sub> , МКМ			Δ <sub>H<sub>i<sup>Фр</sup></sub></sub> , МКМ	Δ <sub>H<sub>i<sup>Тл</sup></sub></sub> , МКМ	Δ <sub>β<sub>i<sup>Фр</sup></sub></sub> , с	Δ <sub>β<sub>i<sup>Тл</sup></sub></sub> , с
0,2	1	-1,332	-1,333	0,00	0,00	2,9	-1,87	1,87	1,87	0,1	0,1
3	2	-1,271	-1,283	15,07	4,03	2,8	-2,18	17,25	6,21	1,1	0,4
4	3	-1,233	-1,240	7,14	1,07	2,7	-2,18	9,32	3,25	0,6	0,2
5	4	-1,187	-1,191	7,21	4,10	2,6	-1,93	9,14	6,03	0,6	0,4
6	5	-1,144	-1,144	4,28	5,14	2,5	-1,71	5,99	6,85	0,4	0,5
7	6	-1,100	-1,098	2,34	5,17	2,4	-1,55	3,89	6,72	0,3	0,5
8	7	-1,057	-1,053	-0,59	4,21	2,3	-1,77	1,18	5,98	0,1	0,5
0,9	8	-1,011	-1,009	-0,52	2,24	2,2	-1,97	1,45	4,21	0,1	0,3
1,0	9	-0,966	-0,962	-1,45	3,28	2,1	-2,3	0,85	5,58	0,1	0,5
1	10	-0,927	-0,921	-8,38	-1,69	2,0	-3,07	-5,31	1,38	-0,5	0,1
2	11	-0,879	-0,875	-6,31	-1,66	1,9	-3,51	-2,80	1,85	-0,3	0,2
3	12	-0,837	-0,832	-10,24	-4,62	1,8	-3,9	-6,34	-0,72	-0,6	-0,1
4	13	-0,790	-0,783	-9,17	-1,59	1,7	-4,48	-4,69	2,89	-0,5	0,3
5	14	-0,743	-0,735	-8,10	0,45	1,6	-4,59	-3,51	5,04	-0,4	0,5
6	15	-0,696	-0,693	-7,03	-3,52	1,5	-4,38	-2,65	0,86	-0,3	0,1
7	16	-0,653	-0,649	-9,97	-5,48	1,4	-3,95	-6,02	-1,53	-0,7	-0,2
8	17	-0,607	-0,604	-9,90	-6,45	1,3	-3,46	-6,44	-2,99	-0,8	-0,4
1,9	18	-0,553	-0,553	-1,83	-1,41	1,2	-2,95	1,12	1,54	0,1	0,2
2,0	19	-0,511	-0,508	-5,76	-2,38	1,1	-2,32	-3,44	-0,06	-0,5	0,0
1	20	-0,466	-0,466	-6,69	-6,34	1,0	-1,83	-4,86	-4,51	-0,7	-0,7
2	21	-0,421	-0,417	-7,62	-3,31	0,9	-1,51	-6,11	-1,80	-1,0	-0,3
3	22	-0,318	-0,326	3,52	-4,24	0,8	-1,51	5,03	-2,73	1,0	-0,5
4	23	-0,278	-0,283	-2,41	-7,21	0,7	-1,44	-0,97	-5,77	-0,2	-1,2
5	24	-0,233	-0,239	-3,34	-9,17	0,6	-1,27	-2,07	-7,90	-0,5	-1,9
6	25	-0,180	-0,180	3,72	3,86	0,5	-1,06	4,78	4,92	1,3	1,3
7	26	-0,142	-0,140	-4,21	-2,10	0,4	-0,76	-3,45	-1,34	-1,1	-0,4
8	27	-0,095	-0,095	-3,14	-3,07	0,3	-0,43	-2,71	-2,64	-1,0	-1,0
2,9	28	-0,045	-0,048	0,93	-2,03	0,2	-0,05	0,98	-1,98	0,4	-0,9
3,0	29	0,000	0,000	0,00	0,00	0,1	0	0,00	0,00	0,0	0,0
							m	5,67	4,23	0,6	0,6



Мал. 7. Графік відхилень від прямолінійності робочої поверхні моста еталона прямолінійності ВЕТУ 01-02-01-98, одержаних з допомогою лазерного трекера

Література

1. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.

[Електр. ресурс]. – Режим доступу: www.faro.com.

2. Травкин, С.В. Разработка методов и средств поверки и калибровки геодезических приборов для измерения превышений // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. – 2007. – 24 с.

3. ASME B89.4.19-2006. Standard – Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems.

4. ISO Working Draft: 10360-10 Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 10: Laser Trackers for measuring point-to-point distances.

5. Draft VDI/VDE 2617 part 10, Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristics and their checking – Acceptance and reverification tests of lasertrackers.

6. Martin, D. Instrument Calibration at the ESRF // FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity Sydney, Australia, April, 2010.

7. FARO Technologies Inc.

Надішла 15.10.12