



АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛАЗЕРНИХ ТРЕКЕРІВ

Виконан анализ состояния имеющихся в Украине и за рубежом методов и средств исследования геометрических параметров и метрологических характеристик лазерных трекеров, описанных в нормативно-методических документах и научных публикациях.

It has been carried out an analysis of existing in Ukraine and abroad methods of study of geometrical parameters and metrological characteristics of laser trackers, which are described in normative methodological documents and scientific publications.

Постановка проблеми. Розвиток геодезичної техніки наразі характеризується появою нових високопродуктивних, високоточних геодезичних приладів – лазерних трекерів. Ці прилади застосовуються для надійного контролю геометричних параметрів виготовлених деталей у будівництві, машино-, приладо-, літако- і суднобудуванні. Але їх ефективне застосування неможливе без сучасних методів метрологічних досліджень, які б дозволяли швидко та з достатньою точністю контролювати зміни геометричних параметрів і метрологічних характеристик самих цих приладів.

Оскільки в Україні лазерні трекери з'явилися недавно і для них ще не розроблено досконалих методів і засобів державної метрологічної атестації та повірки, обрана тема, на наше переконання, є дуже актуальною для дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються даної проблеми. Публікацій, присвячених дослідженню геометричних параметрів та метрологічних характеристик лазерних трекерів, в Україні немає, тому зробимо аналіз зарубіжних видань. У праці [11] розглядається нормативно-методичний документ ASME B89.4.19 [1], розроблений Американським товариством інженерів-механіків, і калібрувальне обладнання, яке забезпечує виконання цих тестів у Національному інституті стандартів і технологій (NIST; США). Аналіз цього документа наведено і в праці [10].

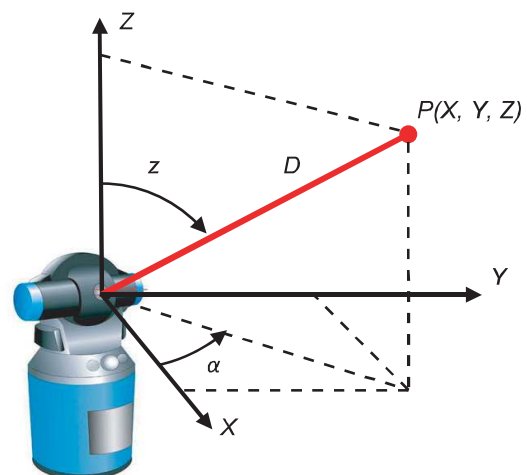
Дослідження метрологічних характеристик, якими є СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів, у ході числового моделювання методами, вказаними в ASME B89.4.19, розглянуто в публікації [8]. Нормативно-методичний документ ISO Working Draft: 10360-10, який ґрунтується на нормативно-методичному документі ASME B89.4.19-2006, проаналізовано в праці [9]. Аналіз виявив багато ідентичностей в обох документах. Двосторонній тест, тобто з вимірюваннями при обертанні приладу на 180° , для дослідження СКП горизонтальних кутів охарактеризовано в статті [12].

Постановка завдання. Мета даного дослідження – аналіз сучасного стану використовуваних в Україні та за кордоном методів і засобів дослідження геометричних параметрів та метрологічних

характеристик лазерних трекерів, описаних у наведених вище нормативно-методичних документах і наукових публікаціях.

Основний зміст роботи. Лазерний трекер (*to track* (англ.) – стежити) – високотехнологічний мобільний координатно-вимірювальний прилад, робота якого спрямована на стеження за спеціальним сферичним відбивачем за допомогою лазерного променя.

Спочатку відбивач розміщується в спеціальному місці (гнізді) на корпусі лазерного трекера, координати якого відомі в системі координат трекера, а звідти його оператор переміщує в контрольовані точки. Трекер має два кутові енкодери, які є аналогами горизонтального і вертикального кругів тахеометрів. Кути, виміряні за допомогою енкодерів, і віддалі, виміряні від трекера вимірювачем віддалей, використовуються для визначення координат X, Y, Z центра сферичного відбивача (мал. 1).



Мал. 1. Принцип роботи з лазерним трекером

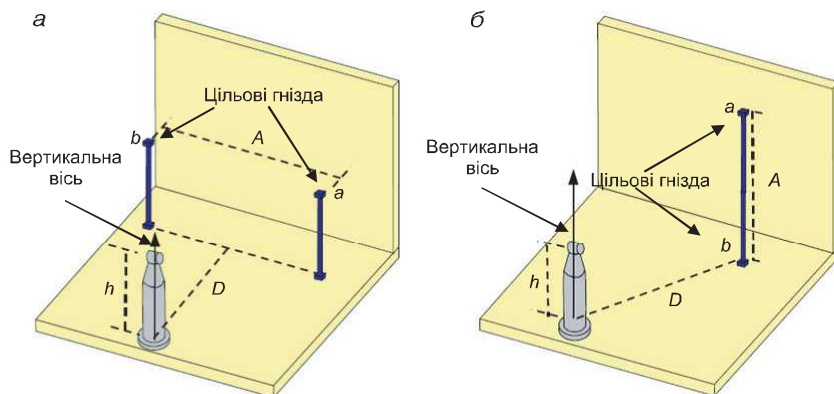
Координати можна одержувати як у статичному, так і в динамічному режимі, тобто під час руху відбивача. Вимірювач віддалей буває двох типів. Це інтерферометр (англ. *distance meter interferometer (DMI)*) чи вимірювач абсолютних віддалей (англ. *absolute distance meter (ADM)*). Різні моделі мають обидва вимірювачі або лише один із них.

Основним міжнародним нормативно-методичним документом, в якому викладено методику



дослідження координатно-вимірювальних систем, є вже згадуваний стандарт ASME B89.4.19-2006 [1]. У ньому описано такі дослідження:

1. **Визначення СКП вимірювання горизонтальних та вертикальних кутів** (мал. 2).



Мал. 2. Горизонтальне (а) та вертикальне (б) положення еталонної міри

Еталонна міра довжини, що має кінцеві точки a та b , встановлюється, як показано на малюнку. Висота h лазерного трекера має бути приблизно такою самою, як і висота цілей у точках a та b . Величина D є відстанню між еталонною мірою і трекером. Вимірювання виконують приладом, розміщеним та зорієнтованим так, як наведено у табл. 1. Тобто трекер повертається перед кожним циклом вимірювань на вказані в цій таблиці горизонтальні кути навколо вертикальної осі. Через те що лазерні трекери мають обмеження в діапазоні вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів, вимірювання повинні бути рівномірно розподілені в цих межах. У кожній позиції виконують по три вимірювання.

Таблиця 1. Розрахунок відстані при горизонтальному, вертикальному, правому і лівому діагональному положенні еталонної міри

Порядковий номер вимірювань	Відстань D , м	Умвне положення трекера відносно точки a , в градусах
1	$1,2A$	0
2	$1,2A$	90
3	$1,2A$	180
4	$1,2A$	270
5	$2,7A$	0
6	$2,7A$	90
7	$2,7A$	180
8	$2,7A$	270

Примітка. A – це довжина еталонної міри, яка повинна бути не менше 2,3 м.

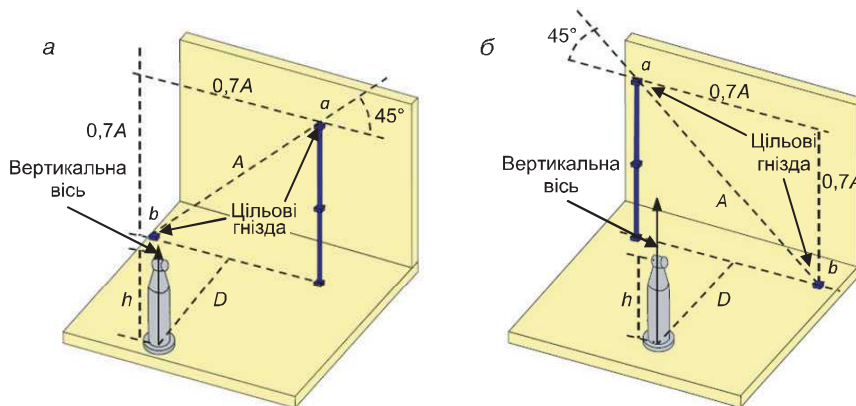
Визначення СКП вимірювання вертикальних кутів виконується, як показано на мал. 2, б. Ета-

лонна міра встановлюється у вертикальне положення. Висота h трекера має бути приблизно посередині між висотами точок a та b , а прилад розміщений та зорієнтований, як показано у табл. 1.

2. **Визначення сумарного впливу похибок вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів** (мал. 3). Дослідження виконують спочатку в правому, а потім у лівому діагональному положенні еталонної міри.

Праве діагональне положення еталонної міри, що має кінцеві точки a та b , встановлюється, як показано на мал. 3, а. Висота трекера, як і в попередньому випадку, також має бути приблизно посередині між висотами точок a та b .

Величина D являє собою відстань між еталонною мірою і лазерним трекером. Крім того, прилад повинен бути розміщений так, щоб



Мал. 3. Праве (а) та ліве (б) діагональне положення еталонної міри

він був приблизно рівновіддаленим від гнізд цілі a і b та зорієнтований, як показано в табл. 1.

Перед кожним циклом вимірювань трекер повертається навколо вертикальної осі на вказані в табл. 1 горизонтальні кути. У кожній позиції роблять по три вимірювання. Аналогічно виконують дослідження в лівому діагональному положенні еталонної міри (мал. 3, б).

Лазерний трекер при вимірюваннях за командою оператора може знаходитися у двох положеннях: фронтальному (*frontsight*) й тильному (*backsight*). Зміна положень здійснюється автоматично обертанням на 180° навколо вертикальної та горизонтальної осей аналогічно зміні положення круга при зніманні теодолітом або тахеометром.

Дослідження трекера у двох положеннях називається *двостороннім тестом*. Його проводять так. Три цільові гнізда розміщені, як показано на мал. 4: c – на підлозі, b – на рівні висоти приладу, a – на рівні, вдвічі вищому від висоти трекера, над цілью, яка знаходиться на підлозі. Величина D – це відстань між приладом і цілью на підлозі. Вимірю-

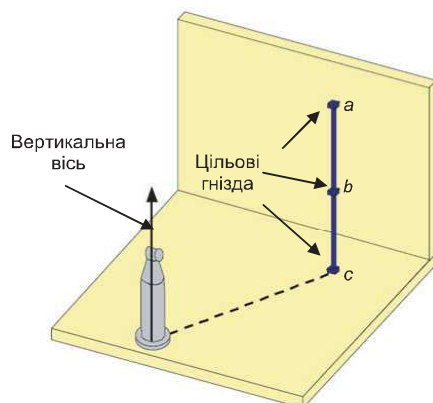


вання здійснюється трекером, розташованим та зорієнтованим, як показано у табл. 2, у двох положеннях.

Таблиця 2. Відстані та горизонтальні кути при двосторонньому тесті

Номер вимірювань	Відстань D , м	Умовне положення трекера відносно точки b , в градусах
1	*	0
2	*	90
3	*	180
4	*	270
5	3	0
6	3	90
7	3	180
8	3	270
9	6	0
10	6	90
11	6	180
12	6	270

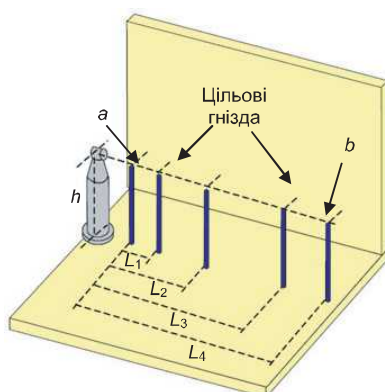
Примітка. * – відстань мінімальна (вертикальний кут має максимальне значення між a і c).



Мал. 4. Двосторонній тест

У кожній позиції виконують по три вимірювання в обох положеннях.

3. **Визначення СКП вимірювання віддалей.** Цілі встановлюють, як показано на мал. 5. Висота h лазерного трекера має бути приблизно такою самою, як і висота цілей a та b , а сам прилад зорієнтований, як показано в табл. 3. Тобто трекер не повертається перед кожним циклом на горизонтальні



Мал. 5. Дослідження СКП вимірювання віддалей

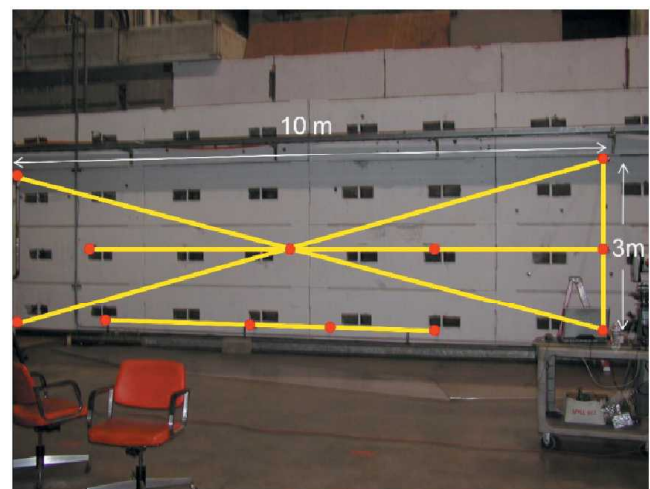
кути навколо вертикальної осі. Довжини L_i розраховуються в залежності від вимірювальної можливості трекера, включаючи дві довжини, обрані користувачем.

Таблиця 3. Розрахунок довжини L_i для дослідження СКП вимірювання віддалей

Номер вимірювань	Довжина	Положення візирної осі трекера відносно точок a і b , в градусах
1	$L_1 = 18\% \cdot R$	90
2	$L_2 = 36\% \cdot R$	90
3	$L_3 = 54\% \cdot R$	90
4	$L_4 = 72\% \cdot R$	90
5	На вибір користувача	90
6	На вибір користувача	90

Примітка. R – максимальний діапазон вимірювання віддалей приладом.

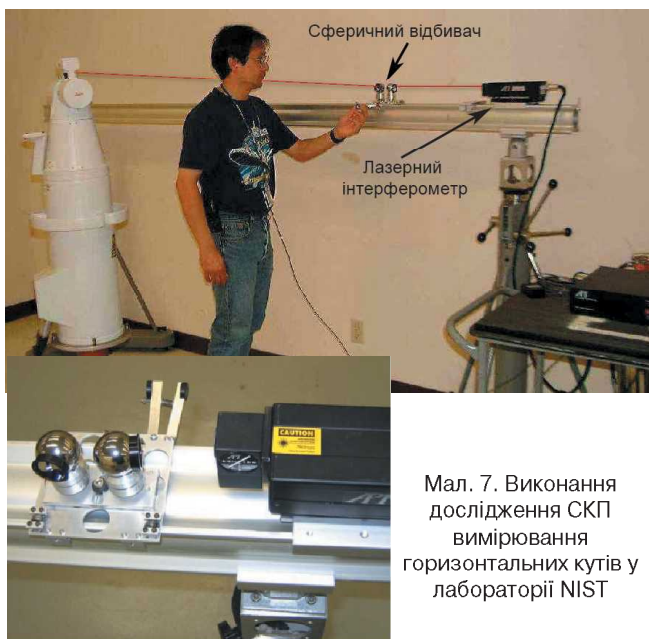
Крім цього нормативно-методичного документа, існують ще два [6 і 2]. Вони відрізняються тим, що СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів визначається при різних положеннях лазерного трекера відносно еталонної міри, а не при одному, як це описано в [1]. А в документі [6] описується ще один метод дослідження (мал. 6).



Мал. 6. Загальний вигляд цільових гнізд, вмонтованих у стінку

У стіні вмонтовано 12 цільових гнізд для сферичного відбивача, просторові відстані між якими відомі. Вимірювання виконують трекером із семи позицій. У кожній з них координати отримують тричі в двох положеннях (*frontsight* і *backsight*) через кожні 120° повороту головки трекера.

За кордоном є багато лабораторій, в яких лазерні трекери повіряються і калібруються за допомогою спеціального метрологічного обладнання. Так, у вже згадуваному Національному інституті стандартів і технологій (США) досліджують СКП вимірювання горизонтальних кутів, як це зображено на мал. 7.



Мал. 7. Виконання дослідження СКП вимірювання горизонтальних кутів у лабораторії NIST

Сферичний відбивач закріплюється на каретці, що рухається по спеціальній колії на відому відстань, яка контролюється інтерферометром. Діагональний тест виконується, як показано на мал. 8, де також використовується інтерферометр. Двосторонній тест проводиться, як зображено на мал. 9.

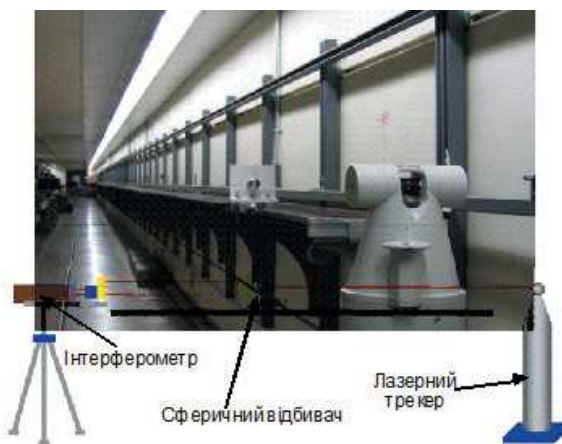


Мал. 8. Процес діагонального тестування сумарного впливу СКП вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів

СКП вимірювання віддалі визначається на спеціальному калібрувальному обладнанні (мал. 10). Сферичний відбивач закріплюється на каретці і пересувається на відому відстань. З протилежного боку відстань вимірюється інтерферометром. Максимальна довжина 60 м. Під час вимірювання датчики фіксують температуру, тиск, вологість повітря у приміщенні. СКП вимірювань еталонних довжин за допомогою інтерферометра становить $(5 + 3 \cdot L (м))$ мкм.



Мал. 9. Принцип проведення двостороннього тесту



Мал. 10. Загальний вигляд метрологічного обладнання лабораторії NIST

Аналогічно СКП вимірювання віддалі досліджують і в Європейському центрі синхротронного випромінювання (ESRF), розташованому в Греноблі (Франція) [7] та в Національній прискорювальній лабораторії (SLAC), яка знаходиться в США [4].

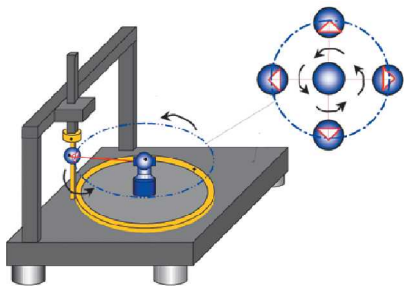
Крім методів, описаних у нормативно-методичному документі ASME B89.4.19-2006, відомі й інші методи калібрування лазерного трекара, наприклад, за допомогою координатно-вимірювальної машини (мал. 11) [13].

Сферичний відбивач прикріплюється до такої машини і переміщується в її робочій зоні. При цьому визначаються координати машиною і трекаром.

Ще один метод полягає в установленні лазерного трекара на поворотний стіл і наведенні його на



дзеркало, а не на сферичний відбивач (мал. 12) [4]. Дзеркало використовується замість сферичного відбивача для усунення зсуву між осями обертання.



Мал. 11. Принцип калібрування лазерного трекера координатно-вимірною машиною

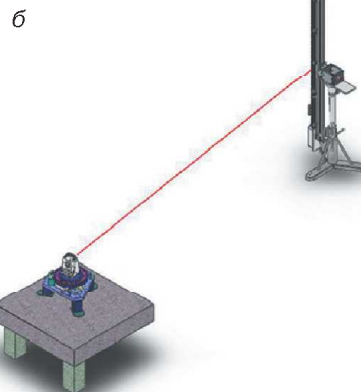
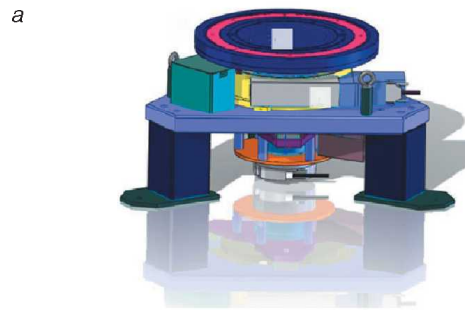


Мал. 12. Загальний вигляд установки для калібрування за допомогою поворотного стола і дзеркала лазерного трекера

Поворотний стіл використовують і в ESRF (мал. 13, а) [7] для вимірювання на сферичний відбивач, для визначення СКП вимірювання вертикальних кутів (мал. 13, б) – у поєднанні з інтерферометром, закріпленим на колії, по якій рухається сферичний відбивач.

Цікавий метод визначення геометричних параметрів та метрологічних характеристик трекерів – лінійно-кутову мережу – запропонували дослідники Національної фізичної лабораторії (NPL) Великої Британії [5,14].

Метод геодезичної мережі для визначення СКП



Мал. 13. Схематичне зображення поворотного стола для визначення СКП вимірювання горизонтальних (а) та вертикальних (б) кутів за допомогою додаткового обладнання лабораторії ESRF

вимірювання горизонтальних кутів лазерним трекером Leica Absolute Tracker AT401 використовували і в лабораторії SLAC (США) [3]. Мережа складалася з 10-ти пунктів, які розташовувалися на висоті головки приладу. Вимірювання виконували тільки в одному положенні (*front-sight*) через кожні 30° повороту приладу. Ефективність методу підтверджено в ході державної метрологічної атестації лазерного трекера в ДП "Укрметрестандарт" (м. Київ).

Сутність методу полягає в створенні трекером локальної інженерно-геодезичної мережі з 15-ти пунктів, розташованих довільно в межах діапазону вимірювань. Приладом виконуються кутові та лінійні вимірювання на ці пункти у двох положеннях (*front-sight* і *back-sight*) з довільної станції (трекер не має центра і не може бути центрований над пунктом геодезичної мережі). Після цього прилад встановлюють на другу довільну станцію і знову виконують вимірювання на всі пункти. Таких вільних станцій, рівномірно розташованих по геодезичній мережі, повинно бути не менше трьох. Метод не потребує спеціального дорогого калібрувального обладнання. Процес вимірювань і оброблення даних займає небагато часу.

Таким чином, різні дослідницькі організації пропонують свої методи досліджень геометричних параметрів та метрологічних характеристик лазерних трекерів, однак, узагальнивши вищевикладене, відмітимо таке:

- ще не розроблено універсальних об'єктивних критеріїв порівняння оцінок метрологічних характеристик лазерних трекерів, отриманих різними



методами і засобами досліджень;

- методики досліджень геометричних параметрів та метрологічних характеристик лазерних трекерів подаються у вигляді кінцевих рекомендацій. Переваг тих або інших методів не вказується. Результати досліджень недоступні широкому загалу вчених;

- використані в нормативно-методичних документах методи та засоби не мають теоретичного обґрунтування достатності вимірювальної інформації в усьому робочому діапазоні вимірювань.

Висновки. На підставі аналізу стану метрологічного забезпечення лазерних трекерів напрошуються такі висновки:

- маємо істотні відмінності в методах та засобах метрологічних досліджень цих трекерів, які пропонують різні організації та дослідницькі лабораторії. Існуючі методи не відповідають вимогам забезпечення єдності вимірювань у частині охоплення геометричних параметрів та метрологічних характеристик приладів;

- фірми-виробники надають споживачеві дуже обмежену інформацію про допустимі відхилення в геометричних параметрах та метрологічних характеристиках трекерів. Інформація про методи і засоби визначення цих характеристик переважно недоступна потенційним користувачам;

- відомі на сьогодні методи контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів фірмами-виробниками призначені для забезпечення випуску приладів, які в основному базуються на спеціалізованому дорогому устаткуванні.

Перспективи подальших досліджень. 1. Потрібно розробити нові науково обґрунтовані методи і засоби визначення геометричних параметрів та метрологічних характеристик трекерів, виходячи з реалій, що склалися в Україні, а також гармонізувати вітчизняну нормативно-методичну базу в галузі метрологічних досліджень цих приладів з міжнародною.

2. Враховуючи постійно зростаючі вимоги до точності виготовлення деталей у промисловості й безперервне підвищення точності лазерних трекерів, необхідно розробити нові методики визначення їхніх геометричних параметрів та метрологічних характеристик з точністю, яка відповідає сучасним вимогам.

Література

1. ASME B89.4.19-2006 Standard – Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems.
2. Draft VDI/VDE 2617 part 10, Accuracy of coordi-

nate measuring machines – Characteristics and their checking. – Acceptance and reverification tests of laser-trackers.

3. Gassner, G. Instrument tests with the new Leica AT401 [Text] / G. Gassner, R. Ruland // Presented at 11th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 2010), DESY, Hamburg, Germany, 13-17 September, 2010.

4. Gassner, G. Laser Tracker Test Facility at SLAC – Progress Report [Text] / G. Gassner, R. Ruland. – In: The 10th International Workshop on Accelerator Alignment. – February 11-15 (2008).

5. Hughes, B. Laser tracker error determination using a network measurement [Text] / B. Hughes, W. Sun, A. Forbes [et al.] // Journal of the Coordinate Metrology Society. – 2010. – Vol. 5(2). – P. 26-32.

6. 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.

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

8. Muralikrishnan, B. ASME B89.4.19 Performance evaluation tests and geometric misalignments in laser trackers [Text] / B. Muralikrishnan, D. Sawyer, C. Blackburn [et al.] // NIST Journal of Research. – January-February 2009. – Vol. 114 (1). – P. 21-35.

9. Muralikrishnan, B. Choosing test positions for laser tracker evaluation and future Standards development [Text] / B. Muralikrishnan, D. Sawyer, C. Blackburn [et al.] // Proceedings of the Coordinate Metrology Systems Conference, Reno, Nevada (2010).

10. Muralikrishnan, B. Performance Evaluation of Laser Trackers [Text] / B. Muralikrishnan, D. Sawyer, C. Blackburn [et al.] // Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, PerMIS'08, Gaithersburg, Maryland, August 19-21 (2008).

11. Muralikrishnan, B. Laser Tracker Testing at NIST using the ASME B89.4.19 Standard [Text] / B. Muralikrishnan, C. Blackburn, D. Sawyer [et al.] // Journal of the Coordinate Metrology Systems Conference. – Autumn 2007. – Vol. 2 (2). – P. 11-17.

12. Muralikrishnan, B. Measuring scale errors in a laser tracker's horizontal angle encoder through simple length measurement and two-face system tests [Text] / B. Muralikrishnan, C. Blackburn, D. Sawyer [et al.] // NIST Journal of Research. – September-October 2010. – Vol. 115(5). – P. 291-301.

13. Ouyang, J.F. Laser Tracker Calibration Using Coordinate Measuring Machine [Text] / J.F. Ouyang, W.L. Liu, D.X. Sun, Y.G. Yan. – In: Proceedings the ASPE, October 9-14, China (2005).

14. Sandwith, S. Large Volume Metrology Conference, LVMC [Text] / S. Sandwith, R. Lott. – Chester, UK, 2007.

Надійшла 30.07.12