

DOI: 10.32347/2076-815X.2024.85.22-30

УДК 528.4

к.т.н, доцент **Адаменко О.В.**,
Adamaleksandr@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7608-1845,
Сарбаш О.О., aleksandrsarbas8@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9116-7860,
д-р. техн. наук, професор **Анненков А.О.**,
geodez74@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3618-5399,
к.т.н., професор **Кузьмич О.Й.**, kuzok@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1762-6344
Циколенко О.В., tsykolenko.ov@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9231-8400,
Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНИХ ТРЕКЕРІВ

Лазерні трекери є ключовими пристроями у сучасній вимірювальній техніці, забезпечуючи високу точність і надійність у вимірюваннях. Однак, забезпечення їхньої ефективності вимагає систематичного контролю їхніх метрологічних характеристик. Статичні та динамічні дослідження є загальноприйнятими методами для оцінки точності вимірювань лазерними трекерами. В цій статті виконується аналіз методів контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів, зокрема застосування матеріальної міри, мережевого методу, контролю з використанням поворотного столу та інтерферометра.

Ключові слова: лазерні трекери; контроль точності; статичні дослідження; динамічні дослідження; віддалемірний блок; точність вимірювань

Постановка проблеми. Лазерні трекери є важливими інструментами в сучасній метрології для вимірювання геометричних параметрів об'єктів з високою точністю. Проте, забезпечення їхньої точності вимірювань вимагає ефективних методів контролю. Аналіз методів контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів є актуальним завданням, оскільки дозволяє визначити той набір методів, який дозволить виконувати контроль точності лазерних трекерів з мінімальними зусиллями і з найвищою надійністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З появою перших лазерних трекерів розпочалося активне дослідження методів контролю їхніх метрологічних характеристик. На сьогоднішній день існують міжнародні та національні стандарти, методики калібрування, захищені дисертації та публікації, які стосуються цієї тематики. Цей значний обсяг наукової роботи сприяє глибшому розумінню виникнення та впливу різноманітних факторів на

результати вимірювань лазерними трекерами. Із розвитком наукових досліджень стає очевидним, що кожен з цих методів контролю має свої переваги та обмеження, і вибір конкретного підходу залежить від конкретних потреб користувача та специфіки вимірювальних завдань.

Розглянуті дослідження та публікації вказують на різноманітні методи контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів. Такі роботи як [1-15] надають важливий внесок у розвиток цієї галузі.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є проведення аналізу різних методів контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів, при статичному та динамічному розташуванні відбивача, щоб з'ясувати їхню ефективність, переваги та недоліки.

Основна частина. Дослідження точності вимірювань лазерним трекером можна поділити на дві групи – дослідження при статичному розташування відбивача під час вимірювань, та динамічні дослідження трекерів, коли відбивач рухається під час вимірювань.

Виконавши аналіз розглянутих методів контролю метрологічних характеристик лазерних трекерів.

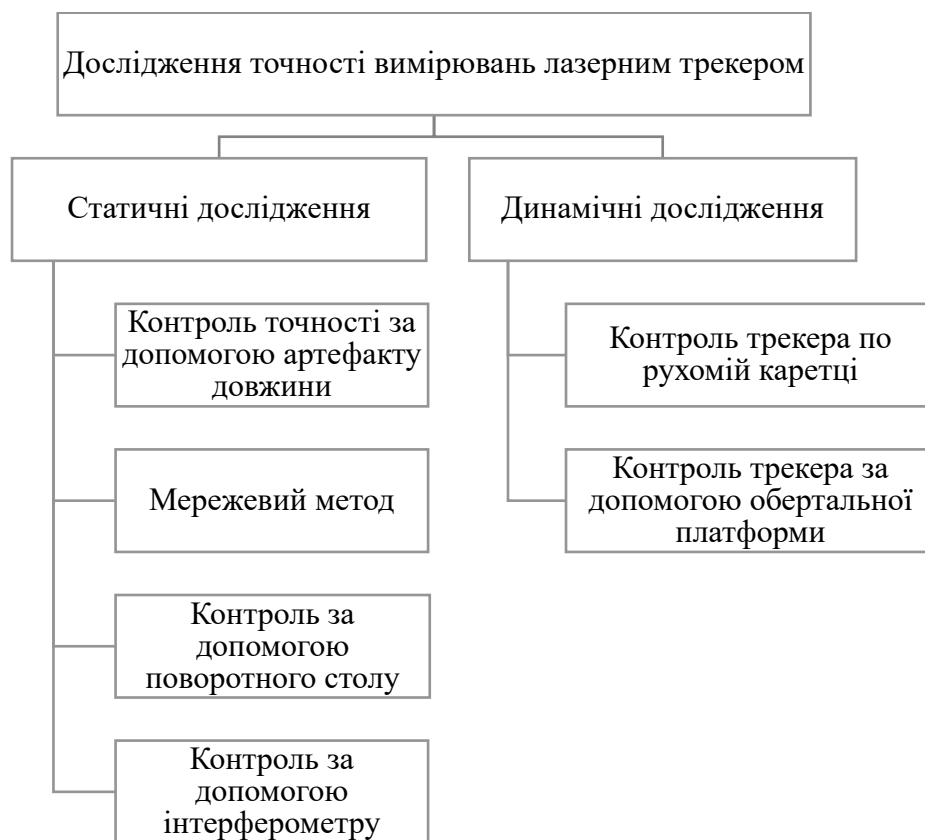


Рис.1. Дослідження точності кутомірного блоку лазерних трекерів.

Методи статичних досліджень, відображені на рис. 1, спрямовані на оцінку точності кутомірного блоку лазерних трекерів. Переважна більшість

дослідників, а також майже усі стандарти, розроблені з питань контролю точності лазерних трекерів, сходяться у поглядах необхідності калібрування віддалемірного блоку приладу шляхом прямих порівнянь результатів вимірювань із еталонним інтерферометром. При цьому можуть використовуватись різні схеми вимірювань – встановлення на рухомій платформі різних відбивачів інтерферометра та трекера, як це показано у роботі [2], або суміщення візирних осей інтерферометра і трекера через спеціальну призму та проведення вимірювань різних приладів одночасно на один відбивач, як це показано у роботі [1]. При виборі будь-якої схеми вимірювань, на нашу думку, виникає проблема відповідності точності вимірювань інтерферометра і трекера. Внаслідок високої точності вимірювань лазерним трекером, дуже часто інтерферометр не може бути використаний в якості еталонного засобу, оскільки не забезпечує необхідного запасу точності в 3 рази, прийнятого в метрології. Вирішення цієї проблеми, на нашу думку, можливе при застосуванні двох інтерферометрів.

Розглянемо статичні методи досліджень. Найбільшого розповсюдження серед методів контролю кутомірного блоку лазерного трекера набув метод з використанням матеріальної міри.

Найбільший вклад у розвиток цього методу досліджень лазерних трекерів внесли науковці з NIST [3]. В роботах NIST було запропоновано нові концепції та методики його використання, було проведено аналіз ефективності використання методу при дослідженні метрологічних характеристик лазерних трекерів.

Виділимо основні переваги методу контролю з використанням матеріальної міри. Серед сильних сторін методу виділимо можливість контролю всіх характеристик лазерного трекера та однозначну простежуваність вимірювань, яка реалізується через матеріальну міру. Відмітимо також доволі прості обчислення при визначенні точності приладу за цим методом та можливість уникнути кореляції між різними виміряними величинами лазерного трекера при обчисленні невизначеності його вимірювань. Це можна досягти шляхом встановлення матеріальної міри вздовж напрямку вимірювань відповідних вимірянних величин лазерного трекера.

Проте зазначений метод має і ряд недоліків, що призводить до необхідності розроблення інших методів контролю. Найбільшим недоліком методу, на нашу думку, є незначний діапазон вимірювань при контролі лазерного трекера, внаслідок чого доволі складно прогнозувати точність приладу при вимірюваннях приладом поза межами цього діапазону. Ускладнення в екстраполяції результатів досліджень, оцінка характеристик трекера на інші точки діапазону вимірювань може бути складною задачею та

вимагати додаткового аналізу. Іншими проблемами методу є посередня швидкість вимірювань та необхідність отримання матеріальної міри необхідного класу точності.

Іншим широко розповсюдженим методом контролю точності лазерних трекерів є мережевий метод. Мережевий метод є одним з найшвидших способів контролю точності лазерних трекерів. Він дозволяє визначити майже всі джерела похибок кутомірної частини приладу. Незважаючи на простоту вимірювань, цей метод вимагає проведення значної кількості непростих обчислень та не має простежуваності у вимірюваннях.

Вперше мережевий метод контролю точності лазерного трекера був описаний у роботах [6]. Подальшим розвитком цього методу займалися науковці з NPL [9] та NIST [7]. Цей метод вимагає розроблення моделі вимірювань трекера. Такі моделі представлені у роботах [8,9]

До переваг методу можна віднести простий процес вимірювань, що поєднується з можливістю визначення більшості кутомірних похибок приладу. Мережевий метод може бути відносно швидким, особливо у порівнянні з іншими методами контролю точності, що дозволяє ефективно виконувати вимірювання. Проте численні переваги методу значно компенсуються його недоліками, оскільки мережевий метод вимагає проведення значної кількості непростих обчислень та не має простежуваності у вимірюваннях. Останній недолік обмежує його застосування в метрологічній діяльності. Це загальновідома проблема, наприклад для її вирішення NIST під час використання цього методу, у склад мережі додає матеріальну міру або якусь іншу довжину, виміряну методом LOS, як вони зробили наприклад у роботі [8].

Розв'язання цієї проблеми приводить нас до глобальної задачі застосування мережевого методу, а саме дослідження конфігурації мережі, яка б з одного боку дозволяла визначити всі необхідні геометричні параметри лазерних трекерів з забезпеченням простежуваності вимірювань, з іншого боку вимагала мінімальної кількості вимірювань.

Ще одним недоліком методу є ускладнення з обчисленням невизначеності вимірювань лазерним трекером за результатами вимірювань. Наявні методи або занадто складні у повсякденному використанні або занадто наближені.

У цілому, мережевий метод є корисним інструментом для контролю точності лазерних трекерів, але вимагає уважного планування, обробки даних та врахування потенційних проблем, щоб досягнути найкращих результатів.

Контроль точності вимірювань горизонтальних кутів лазерних трекерів можливо виконувати за допомогою високоточного поворотного столу. При цьому можуть застосовуватись різні варіації методу, в якості еталонного

обладнання може виступати сам поворотний стіл [4], так і міра площинного кута, встановлена між столом та лазерним трекером.

Гасснер і Руланд [4] розробили випробувальний стенд для калібрування горизонтального кута лазерного трекера на основі високоточного поворотного столу.

Робота [11] авторів є загальною роботою із описом всіх досліджень авторів, а саме дослідження трекера за допомогою декартової координатно-виміральної машини, дослідження лазерного трекера по мережі закріплених у трьох рівнях 23 гнізд, та дослідження лазерного трекера за допомогою поворотного столу.

В цілому, використанні поворотного столу дозволяє визначити всі характеристики точності лазерного трекера при вимірюванні горизонтальних кутів. Проте застосування цього методу лишає відкритим питання дослідження точності вимірювань вертикальних кутів лазерним трекером, де відсутній метод, аналогічний цьому.

Виконувати контроль точності вимірювань горизонтальних і вертикальних кутів лазерним трекером можливо також і за допомогою інтерферометру. Більше того, цей метод був запропонованим одним із перших.

У роботі [12] Соєр та ін. описують метод калібрування системи лазерного трекера за допомогою інтерферометра. Мартін, Д. і Четвінд, Д. [13] в своїй роботі пропонують використовувати рейку із рухомою кареткою для контролю точності вимірювань лазерним трекером. Положення каретки контролюється лазерним інтерферометром.

Цей метод в цілому схожий до методу із застосуванням матеріальної міри, та має схожі переваги та недоліки. Проте і має ряд відмінностей. По перше, цей метод дозволяє визначити більші за довжину матеріальної міри зміщення каретки та збільшувати таким чином контрольований діапазон вимірювань. З іншого боку значно ускладнюється процес вимірювань та з'являються додаткові похибки у вимірюваннях, складні для врахування, наприклад прогин самої платформи, вздовж якої рухається каретка.

Одними із перших динамічні дослідження лазерного трекера було виконано науковцями з університету Північної Кароліни (США), описані у дисертації Вікторії Велти [15], а також, частково, у роботі [5]. Автори досліджували лазерний трекер за допомогою обертальної платформи та за допомогою рухомої каретки. У другому випадку встановлювали зміщення каретки тільки у напрямках вимірювань горизонтальних, вертикальних кутів та відстаней.

Подібні дослідження, а саме дослідження точності стеження за рухомою кареткою були виконані у роботі [10]. Використання методу контролю за

допомогою рухомої каретки дозволяє проводити динамічні дослідження різних вимірювальних частин лазерних трекерів, зокрема горизонтальних та вертикальних кутів, а також відстаней. Проте у методі виникають одна із кількох можливих проблем: низька точність визначення еталонних значень зміщень у динаміці, недостатня синхронізація вимірювань трекера та еталону або малий діапазон вимірювань.

Метод контролю трекера за допомогою обертальної платформи дозволяє ефективно визначати джерела похибок при вимірюванні у русі. Проте для контролю вертикальних кутів потрібні додаткові дослідження та методики. В роботі [14] виконано подібні дослідження на модифікованій обертальній платформі.

Використання обертальної платформи вирішує проблему визначення еталонного значення переміщень відбивача під час динамічних досліджень. Проте, за цим методом неможливо однозначно розділити вплив різних вимірних елементів на результуючу похибку лазерного трекера. Іншою проблемою методу є доволі малий діапазон досліджень трекера у динаміці.

Висновки. Таким чином, всі наявні методи контролю лазерних трекерів мають певні недоліки, що ускладнюють їх використання. На нашу думку, найбільш перспективною комбінацією методів при дослідженні лазерних трекерів у статичі є комбінація методів контролю віддалеміра за допомогою інтерферометрів та кутомірної частини за допомогою мережевого методу, або комбінація методів контролю віддалеміра за допомогою інтерферометрів і горизонтальних кутів за допомогою поворотного столу.

У першому варіанті дослідженням підлягають конфігурація мережі з урахуванням необхідності простежуваності вимірювань до еталонних засобів та однозначного визначення невизначеності вимірювань. У другому варіанті необхідно запропонувати швидкій та надійним метод досліджень точності вимірювань вертикальних кутів лазерним трекером.

Методи дослідження точності лазерних трекерів у динаміці вимагають подальшого дослідження. Можливим вирішенням проблеми може бути дослідження лазерних трекерів по обертальній платформі при зміні її осі у просторі.

Список використаних джерел

1. Gruza, M., Gąska, A., Sładek, J., Stojadinovic, S., Vidosav, M., Gąska, P., & Harmatys, W. (2021). Method for Accuracy Assessment of the Length Measurement Unit of Laser Tracking Systems. *Applied Sciences*, 11(19), 9335. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199335>
2. Muralikrishnan, Bala & Sawyer, D. & Blackburn, Christopher & Phillips, Steven & Borchardt, B. & Estler, Tyler. (2008). Performance evaluation of laser trackers. DOI: 10.1145/1774674.1774698.

3. Muralikrishnan, B., Phillips, S., Sawyer, D. (2016). Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering*, 44, 13-28.
4. Gassner, G., & Ruland, R. (2008). *Laser Tracker Calibration - Testing the Angle Measurement System*. Menlo Park, California. Available at: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc895734>
5. Edward Morse, Victoria Welty. Dynamic testing of laser trackers, *CIRP Annals*, Volume 64, Issue 1, 2015, p 475-478, ISSN 0007-8506, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.090>.
6. Calkins JM 2002 Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems, Copyright 2002, Joseph M. Calkins.
7. Wang, L., Muralikrishnan, B., Shakarji, C. and Sawyer, D. (2020), Performance evaluation of laser trackers using the network method, *Measurement Science and Technology*.
8. Icasio, Octavio & Bellelli, Diego & Vieira, Luiz & Cano, Daniel & Muralikrishnan, Bala. (2021). Validation of the network method for evaluating uncertainty and improvement of geometry error parameters of a laser tracker. *Precision Engineering*. 72. [10.1016/j.precisioneng.2021.07.005](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.07.005)
9. Hughes, Ben & Sun, Wenjuan & Forbes, Alistair & Lewis, Andrew. (2010). Determining laser tracker alignment errors using a network measurement. *Journal of the CMSC*. 5. 26-32.
10. YANG Fan, FAN Bai-xing, LI Guang-yun, YANG Zai-hua. Accuracy Testing on Dynamic Measurement of Laser Tracker. *Acta Metrologica Sinica*, 2014, 35(z1): 119-122
11. Majarena, Ana & Conte, Javier & Santolaria, Jorge & Acero, Raquel. (2017). A New Methodology for Kinematic Parameter Identification in Laser Trackers. [10.5772/intechopen.71444](https://doi.org/10.5772/intechopen.71444)
12. Sawyer, D.; Borchardt, B.; Phillips, S.; Fronczek, C.; Estler, W. A Laser Tracker Calibration System. In *Proceedings of the Measurement Science Conference*, Anaheim, CA, USA, 23–25 January 2002.
13. Martin, D., & Chetwynd, D. (2009). Angle calibration of robotic total stations and laser trackers. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 3. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.821231>
14. Lv, F.; Hu, C.; Sun, H.; Li, W. Study on Dynamic Performance Parameters of Laser Tracker Based on Self-Developed Circular Trajectory Generator System. *Appl. Sci.* 2023, 13, 167. <https://doi.org/10.3390/app13010167>
15. Victoria Welty DYNAMIC EVALUATION OF LASER TRACKERS A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering

Ph.D., Associate Professor **Adamenko Oleksandr**, **Sarbash Oleksandr**,
Dr. of Engineering, Professor **Annenkov Andriy**,
Ph.D., Professor **Kuzmych Oleksandr**, Assistant **Tsykolenko Olena**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

ANALYSIS OF METHODS FOR CONTROLLING METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF LASER TRACKERS

Laser trackers are pivotal components within contemporary measurement technology, offering unparalleled precision and reliability in measurement processes. Yet, maintaining their effectiveness mandates a systematic approach to controlling their metrological traits. Both static and dynamic research methodologies are

routinely employed to evaluate the accuracy of laser trackers. This article embarks on a detailed exploration of the methodologies employed to regulate the metrological attributes of laser trackers, encompassing the utilization of length artifacts, network methodologies, control mechanisms utilizing rotary tables, and interferometry techniques. By delving into these methodologies, the article endeavors to establish a robust framework for evaluating the accuracy and reliability of laser trackers. This process stands as a critical juncture in guaranteeing their effectiveness across various measurement tasks. The meticulous analysis of these methods is instrumental in enhancing the precision and dependability of laser trackers, thereby bolstering their utility across diverse industrial and scientific domains. Consequently, efforts directed towards refining the metrological characteristics of laser trackers play an indispensable role in the continuous advancement of measurement technology. They facilitate the seamless integration of laser trackers into an array of applications, ensuring their efficacy and reliability in addressing complex measurement challenges encountered in modern industries and scientific research endeavors.

Keywords: laser trackers; accuracy control; static investigations; dynamic investigations; ranging unit; measurement accuracy.

REFERENCES

1. Gruza, M., Gąska, A., Śladek, J., Stojadinovic, S., Vidosav, M., Gąska, P., & Harmatys, W. (2021). Method for Accuracy Assessment of the Length Measurement Unit of Laser Tracking Systems. *Applied Sciences*, 11(19), 9335. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199335> {in English}
2. Muralikrishnan, Bala & Sawyer, D. & Blackburn, Christopher & Phillips, Steven & Borchardt, B. & Estler, Tyler. (2008). Performance evaluation of laser trackers. DOI: 10.1145/1774674.1774698. {in English}
3. Muralikrishnan, B., Phillips, S., Sawyer, D. (2016). Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review. *Precision Engineering*, 44, 13-28. {in English}
4. Gassner, G., & Ruland, R. (2008). *Laser Tracker Calibration - Testing the Angle Measurement System* -. Menlo Park, California. Available at: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc895734> {in English}
5. Edward Morse, Victoria Welty. Dynamic testing of laser trackers, *CIRP Annals*, Volume 64, Issue 1, 2015, p 475-478, ISSN 0007-8506, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.090>. {in English}
6. Calkins JM 2002 Quantifying coordinate uncertainty fields in coupled spatial measurement systems, Copyright 2002, Joseph M. Calkins. {in English}

7. Wang, L., Muralikrishnan, B., Shakarji, C. and Sawyer, D. (2020), Performance evaluation of laser trackers using the network method, *Measurement Science and Technology*. {in English}
8. Icasio, Octavio & Bellelli, Diego & Vieira, Luiz & Cano, Daniel & Muralikrishnan, Bala. (2021). Validation of the network method for evaluating uncertainty and improvement of geometry error parameters of a laser tracker. *Precision Engineering*. 72. 10.1016/j.precisioneng.2021.07.005 {in English}
9. Hughes, Ben & Sun, Wenjuan & Forbes, Alistair & Lewis, Andrew. (2010). Determining laser tracker alignment errors using a network measurement. *Journal of the CMSC*. 5. 26-32. {in English}
10. YANG Fan, FAN Bai-xing, LI Guang-yun, YANG Zai-hua. Accuracy Testing on Dynamic Measurement of Laser Tracker. *Acta Metrologica Sinica*, 2014, 35(z1): 119-122 {in English}
11. Majarena, Ana & Conte, Javier & Santolaria, Jorge & Acero, Raquel. (2017). A New Methodology for Kinematic Parameter Identification in Laser Trackers. 10.5772/intechopen.71444 {in English}
12. Sawyer, D.; Borchardt, B.; Phillips, S.; Fronczek, C.; Estler, W. A Laser Tracker Calibration System. In *Proceedings of the Measurement Science Conference, Anaheim, CA, USA, 23–25 January 2002*. {in English}
13. Martin, D., & Chetwynd, D. (2009). Angle calibration of robotic total stations and laser trackers. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 3. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.821231> {in English}
14. Lv, F.; Hu, C.; Sun, H.; Li, W. Study on Dynamic Performance Parameters of Laser Tracker Based on Self-Developed Circular Trajectory Generator System. *Appl. Sci.* 2023, 13, 167. <https://doi.org/10.3390/app13010167> {in English}
15. Victoria Welty DYNAMIC EVALUATION OF LASER TRACKERS A thesis submitted to the faculty of The University of North Carolina at Charlotte in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering {in English}