

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 528.48

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ЭТАЛОНИРОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО
ТРЕКЕРА ПРЕЦИЗИОННОЙ ТОЧНОСТИ

© 2020 Т.М. Пимшина*, Д.М. Арсеньев**, И.Ю. Пимшин***

*Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия

**Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

***ООО «НПФ «Инженерная геодезия», Ростов-на-Дону, Россия

В статье рассмотрены вопросы повышения точности измерений, что особенно важно при монтаже и эксплуатации технологического оборудования. Представлена методика исследования точности определения прямоугольных координат контролируемых точек, измеренных электронным тахеометром. Для метрологического эталонирования высокоточных электронных тахеометров на коротких расстояниях (до 60 м) предлагается использовать лазерный трекер прецизионной точности. Приведены результаты практического апробирования предложенного способа метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра.

Ключевые слова: координатно-измерительная система; электронный тахеометр; лазерный трекер; инструментальные погрешности измерений; повышение точности; определение прямоугольных координат контролируемых точек; поправки в результаты замеров.

Поступила в редакцию 20.10.2020

После доработки 28.10.2020

Принята к печати 03.11.2020

Одним из основных условий решения производственных задач является критерий точности. Общеизвестно, что основными источниками ошибок измерений являются личные, инструментальные и обусловленные влиянием внешней среды. Личные ошибки исключаются внедрением автоматизации измерений. Ошибки, обусловленные влиянием внешней среды, учитываются введением поправок за метеоданные, выбора оптимального времени, когда воздействие внешних факторов минимально и т.д. Инструментальные ошибки минимизируются метрологическим эталонированием средств измерений [1]. Данный подход для повышения точности замеров позволяет выполнять геодезические работы на пределе точностной возможности приборов, что особенно актуально при контроле геометрических параметров для монтажа или эксплуатации технологического оборудования.

На сегодняшний момент времени наиболее популярными геодезическими приборами являются электронные тахеометры, являющиеся универсальными координатно-измерительными системами, объединяющими в себе электронный теодолит, светодальномер и микроЭВМ [2]. Электронные тахеометры работают в полярной системе координат, то есть измеряют горизонтальные, вертикальные углы и наклонные расстояния от прибора до контролируемой точки. У современных тахеометров паспортная точность измерения углов варьируется в пределах от 0,5" до 6" и наклонных расстояний в пределах от $\pm(0,5+1 \text{ мм/км}\times D)\text{мм}$ до $\pm(3+2 \text{ мм/км}\times D)\text{мм}$. Однако при расчетах, обработке и анализе данных наиболее удобно использовать прямоугольную систему координат. Приведем формулы (1) и (2) перевычисления [3] полярной системы координат в прямоугольную систему координат:

$$x_i = x_{CT} + \Delta x_i = x_{CT} + S_i \cos \nu_i \cos \alpha_i, \quad (1)$$

$$y_i = y_{CT} + \Delta y_i = y_{CT} + S_i \cos \nu_i \sin \alpha_i, \quad (2)$$

где x_i, y_i – прямоугольные координаты контролируемых точек;

x_{CT}, y_{CT} – прямоугольные координаты станции стояния прибора;

$\Delta x_i, \Delta y_i$ – приращения координат между прибором и контролируемыми точками;

ν_i, α_i – вертикальные и горизонтальные углы, измеряемые прибором;

S_i – измеряемые наклонные расстояния от прибора до искомым точек.

Используя данные формулы, перешли к их средним квадратическим ошибкам, формулы (3)-(5):

$$m_x^2 = m_{x_{CT}}^2 + m_S^2 \cos^2 \nu \cos^2 \alpha + S^2 \sin^2 \nu \cos^2 \alpha \frac{m_\nu^2}{\rho^{n^2}} + S^2 \cos^2 \nu \sin^2 \alpha \frac{m_\alpha^2}{\rho^{n^2}}, \quad (3)$$

$$m_y^2 = m_{y_{CT}}^2 + m_S^2 \cos^2 \nu \sin^2 \alpha + S^2 \sin^2 \nu \sin^2 \alpha \frac{m_\nu^2}{\rho^{n^2}} + S^2 \cos^2 \nu \cos^2 \alpha \frac{m_\alpha^2}{\rho^{n^2}}, \quad (4)$$

$$m_{xy} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \quad (5)$$

где m_x, m_y, m_{xy} – средние квадратические ошибки определения прямоугольных координат контролируемых точек;

x_{CT}, y_{CT} – средние квадратические ошибки прямоугольных координат станции стояния прибора;

m_ν, m_α, m_S – средние квадратические ошибки измерения вертикальных, горизонтальных углов и наклонного расстояния;

ρ – один радиан, угол образованный двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу, $\rho = 180^\circ/\pi$.

Используя вышеприведенные формулы, построим график зависимости средних квадратических ошибок определения прямоугольных координат контролируемых точек от точности измерений углов и расстояний, а также величин горизонтальных углов (рис. 1). Варьирования были приняты следующие. Горизонтальные углы изменялись в пределах от 0° до 180° . Величина вертикального угла была принята 0° . Наклонное расстояние взяли равным 50 м. Средние квадратические ошибки измерения углов были приняты $1''$, а определения наклонных расстояний 1 мм.

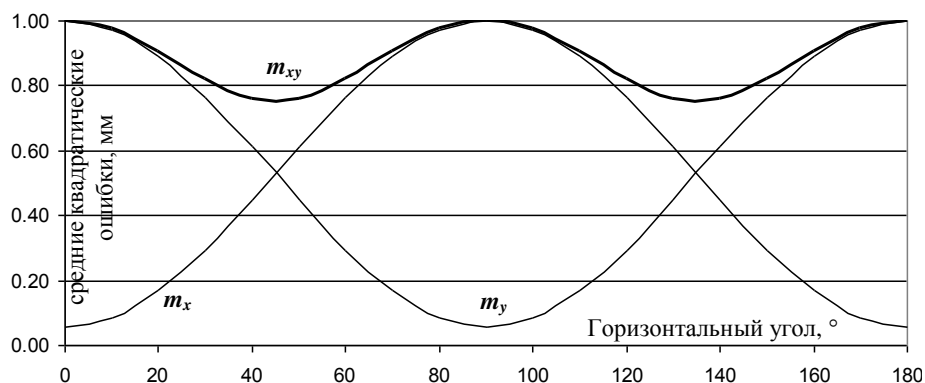


Рисунок 1 – График зависимости средних квадратических ошибок определения прямоугольных координат (m_x, m_y, m_{xy}) электронным тахеометром [Graph of the dependence of the mean square errors in determining rectangular coordinates (m_x, m_y, m_{xy}) by an electronic tacheometer]

Если измерения выполняются с одной станции в системе координат электронного тахеометра, то средними квадратическими ошибками координат станции стояния прибора, а также его высотой можно пренебречь. В этом случае средние квадратические ошибки положения плано-высотных координат контролируемых точек прямо пропорциональны величинам измеряемых горизонтальных, вертикальных углов и наклонных расстояний, а также погрешностям их измерений [4, 5].

Для метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра на коротких расстояниях (до 80 м) предлагается использовать лазерный трекер. Трекер также как и тахеометр работает в полярной системе координат, то есть измеряют горизонтальные, вертикальные углы и наклонные расстояния. При этом точность измерений лазерного трекера на порядок выше, чем у любого электронного тахеометра. Например, у FARO Laser Tracker Vantage паспортная точность измерения углов составляет $\pm 20 \text{ мкм} + 5 \text{ мкм/м}$ ($\pm 0,0008'' + 0,0002''/\text{м}$) и наклонных расстояний $\pm 16 \text{ мкм} + 0,8 \text{ мкм/м}$ [6, 7].

Методика исследования точности измерения прямоугольных координат электронным тахеометром при помощи лазерного трекера заключается в следующем. Данные приборы на штативах вплотную друг к другу устанавливаются в конце коридора, размер которого должен быть не менее 50 м. Системы координат обоих приборов ориентируют вдоль коридора. Затем вдоль оси абсцисс электронного тахеометра на расстоянии минимального фокусного расстояния устанавливают отражатель лазерного трекера на специальном штативе. По данному отражателю выполняют одновременные многократные измерения электронным тахеометром и лазерным трекером (рис. 2). Первый замер является исходным (базовым) для всех других измерений в данном (первом) цикле. После этого отражатель лазерного трекера на специальном штативе последовательно перемещается вдоль оси абсцисс электронного тахеометра с шагом порядка 1 м до конца коридора. При каждой постановки отражателя выполняются многократные измерения электронным тахеометром и лазерным трекером (первый цикл измерений). Затем трекер тахеометра разворачивают на головке штатива на угол равный порядка 45° и все вышеописанные действия повторяют (второй цикл измерений). Вышеописанные действия повторяют и при развороте трекера тахеометра относительно его первоначального положения на угол 90° (третий цикл измерений).

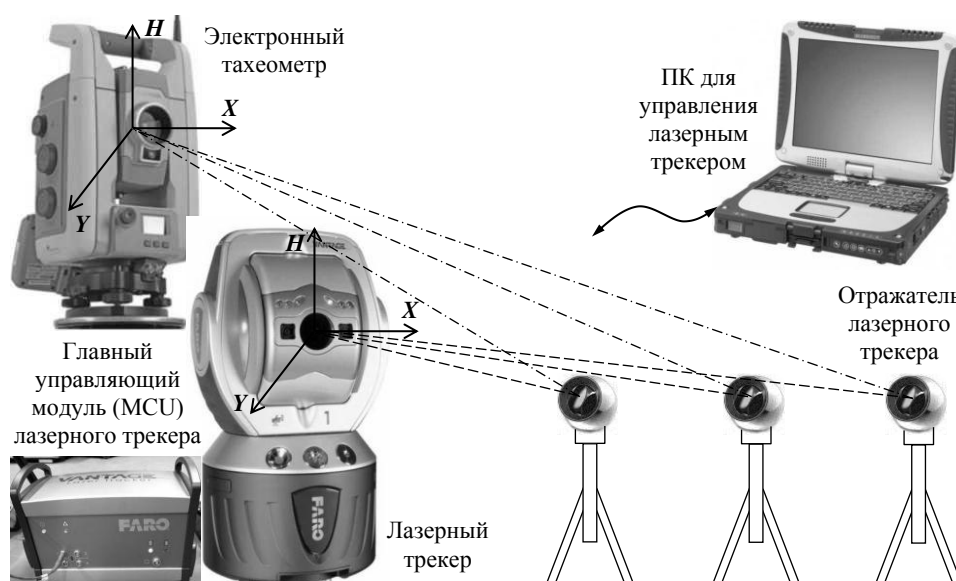


Рисунок 2 – Схема метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра при помощи лазерного трекера [Scheme of metrological standardization of a high-precision electronic tacheometer using a laser tracker]

Обработка результатов измерений для одного цикла выполняется в следующей последовательности. По общеизвестным формулам (6)-(10) [8] выполняют преобразование прямоугольных координат при одновременном переносе и повороте осей системы координат лазерного трекера в систему координат электронного тахеометра:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_n^{mp.}}{x_n^{mp.}}\right) - \operatorname{arctg}\left(\frac{y_n^{max.}}{x_n^{max.}}\right), \quad (6)$$

$$x_0 = x_i^{max.} - x_i^{mp.} \cos \theta + y_i^{mp.} \sin \theta = -x_i^{mp.} + x_i^{max.} \cos \theta + y_i^{max.} \sin \theta, \quad (7)$$

$$y_0 = y_i^{max.} - x_i^{mp.} \sin \theta - y_i^{mp.} \cos \theta = -y_i^{mp.} - x_i^{max.} \sin \theta + y_i^{max.} \cos \theta, \quad (8)$$

$$x_i^{n.mp.} = (x_i^{max.} - x_0) \cos \theta + (y_i^{max.} - y_0) \sin \theta, \quad (9)$$

$$y_i^{n.mp.} = -(x_i^{max.} - x_0) \sin \theta + (y_i^{max.} - y_0) \cos \theta, \quad (10)$$

где θ – угол разворота системы координат лазерного трекера относительно системы координат электронного тахеометра;

x_0, y_0 – несовпадение начал систем координат приборов;

$x_i^{max.}, y_i^{max.}$ – координаты точек измеренные электронным тахеометром;

$x_i^{mp.}, y_i^{mp.}$ – координаты точек измеренные лазерным трекером;

$x_i^{n.mp.}, y_i^{n.mp.}$ – координаты контролируемых точек лазерного трекера преобразованные в систему координат электронного тахеометра.

Преобразование прямоугольных декартовых координат точек, измеренных лазерным трекером, в систему координат электронного тахеометра нужно сделать для каждого цикла по отдельности. Затем для каждого цикла по отдельности вычисляют разность преобразованных координат, измеренных лазерным трекером, с координатами, определенными электронным тахеометром по формулам (11) и (12):

$$\Delta_{Xi} = x_i^{max.} - x_i^{n.mp.}, \quad (11)$$

$$\Delta_{Yi} = y_i^{max.} - y_i^{n.mp.}, \quad (12)$$

где Δ_{Xi}, Δ_{Yi} – погрешности измерения координат электронным тахеометром на разных измеряемых расстояниях.

Общие (абсолютные) погрешности измерения прямоугольных координат электронным тахеометром на разных расстояниях определяются по формуле (13):

$$\Delta_{XYi} = \sqrt{\Delta_{Xi}^2 + \Delta_{Yi}^2}. \quad (13)$$

По полученным абсолютным погрешностям строят график их зависимости от величины измеряемых расстояний и вычисляют среднюю квадратическую ошибку определения прямоугольных координат электронным тахеометром на коротких расстояниях по формуле (14) Гаусса:

$$m_{xyi} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_{xyi}^2}{n}}. \quad (14)$$

По предложенному способу метрологического эталонирования высокоточного электронного тахеометра при помощи лазерного трекера выполнено практическое апробирование. Для этого использовался лазерный трекер FARO Laser Tracker Vantage и высокоточный роботизированный электронный тахеометр *Trimble S6* с паспортной точностью измерения горизонтальных и вертикальных углов 1" и точностью измерений наклонных расстояний $\pm 0,8 \text{ мм} + 1 \text{ мм D} \times 10^{-6}$.

Пример графика зависимости полученных абсолютных погрешностей прямоугольных координат контролируемых точек от величин измеряемых расстояний и горизонтального угла, равного 45° , приведен на рисунке 3.

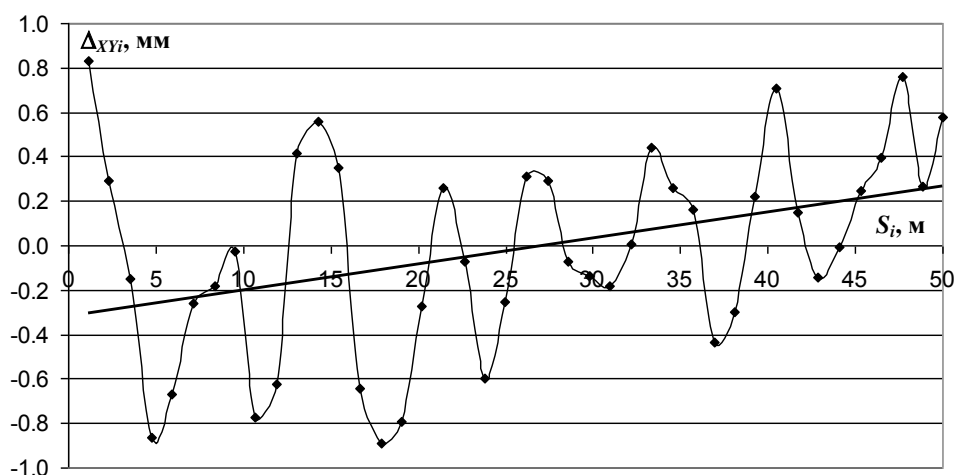


Рисунок 3 – График зависимости абсолютных погрешностей прямоугольных координат от величин измеряемых расстояний, измеренных электронным тахеометром [The graph of the dependence of the rectangular coordinates absolute errors on the values of the measured distances measured by an electronic tacheometer]

Средняя квадратическая ошибка определения прямоугольных координат электронным тахеометром *Trimble S6* на коротких расстояниях (до 50 м) составила 0,45 мм, что превышает его паспортную точность почти в 2 раза. Таким образом, исследована реальная (фактическая) точность измерения прямоугольных координат электронным тахеометром для различных расстояний (от 1,2 до 50 м) и горизонтальных углов (0° , 45° , 90°), что обеспечивает возможность достижения предельной инструментальной точности измерений. Это особенно важно при определении геометрических параметров для монтажа и эксплуатации технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.009-1984 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 27 с.
2. ГОСТ Р 51774-2001 Тахеометры электронные. Общие технические условия. – Москва : ИПК издательство стандартов, 2001. – 12 с.
3. Губеладзе, А. Р. Методика эталонирования электронных дальномеров и тахеометров / А. Р. Губеладзе, Г. А. Науменко, Л. Ф. Литвинова, И. Г. Гайрабеков, И. Ю. Пимшин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008. – Специальный выпуск. – С. 113-116.
4. Пимшин, И. Ю. Исследование зависимости погрешностей взятия отсчетов геодезическими электронными приборами от расстояния между прибором и

- визирной целью / И. Ю. Пимшин, Т. М. Пимшина // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (TRANSPORT-2016). 12-15 апреля 2016 г. – Ростов-на-Дону : ФГБОУ ВО РГУПС, 2016. – С.101-103.
5. Пимшина, Т. М. Исследование влияния циклических ошибок светодальномеров на измерения электронных тахеометров / Т. М. Пимшина, И. Ю. Пимшин, А. А. Забарин // Сборник научных трудов конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (TRANSPROMЭК-2018). 01-02 марта 2018 г. – Ростов-на-Дону : ФГБОУ ВО РГУПС, 2018. – С. 162-165.
 6. Ткачев, К. Н. Лазерная координатно-измерительная система FARO Laser Tracker / К.Н. Ткачев // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 12. – С. 59-61.
 7. Гришанов, В. Н. Современные лазерные измерительные системы В производственном цикле космической техники / В. Н. Гришанов, А. А. Ойнонен // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 1 (32). – С. 24-35.
 8. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1978. – 831 с.

REFERENCES

- [1] GOST 8.009-1984 Normiruyemyye metrologicheskiye kharakteristiki sredstv izmereniy [Standardized Metrological Characteristics of Measuring Instruments]. Moskva: Standartinform [Moscow: Standartinform]. 2006. 27 p. (in Russian).
- [2] GOST R 51774-2001 Takheometry elektronnyye. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Electronic Tacheometers. General Specifications]. Moskva : IPK izdatel'stvo standartov [Moscow: IPK Publishing House of Standards]. 2001. 12 p. (in Russian).
- [3] Gubeladze A.R., Naumenko G.A., Litvinova L.F., Gairabekov I.G., Pimshin I.Yu. Metodika etalonirovaniya elektronnykh dal'nomerov i takheometrov [Method of Standardization of Electronic Rangefinders and Tacheometers]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskiye nauki [News Of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Science]. Spetsial'nyy vypusk [Special issue]. P. 113-116 (in Russian).
- [4] Pimshin I.Yu., Pimshina T.M. Issledovaniye zavisimosti pogreshnostey vzyatiya otschetov geodezicheskimi elektronnyimi priborami ot rasstoyaniya mezhdub priborom i vizirnoy tsel'yu [Investigation of the Dependence of the Sampling Errors by Geodetic Electronic Devices on the Distance between the Device and the Sighting Target]. Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transport: nauka, obrazovaniye, proizvodstvo» (TRANSPORT-2016) [Collection of Scientific Papers of the International Scientific-Practical Conference "Transport: Science, Education, Production" (TRANSPORT-2016)]. 12-15 aprelya 2016 g. Rostov-na-Donu: FGBOU VO RGUPS [April 12-15, 2016. Rostov-on-Don: FGBOU VO RGUPS]. 2016. P. 101-103 (in Russian).
- [5] Pimshina T.M., Pimshin I.Yu., Zabarin A.A. Issledovaniye vliyaniya tsiklicheskih oshibok svetodal'nomerov na izmereniya elektronnykh takheometrov [Investigation of the Influence of Cyclic Errors of Light Rangefinders on the Measurements of Electronic Tacheometers]. Sbornik nauchnykh trudov konferentsii «Aktual'nyye problemy i perspektivy razvitiya transporta, promyshlennosti i ekonomiki Rossii» (TRANSPROMEK-2018) [Collection of Scientific Papers of the Conference "Actual Problems and Prospects for the Development of Transport, Industry and Economy of Russia" (TRANSPROMEK-2018)]. 01-02 marta 2018 g. Rostov-na-Donu: FGBOU VO RGUPS [March 01-02, 2018. Rostov-on-Don: FGBOU VO RGUPS]. 2018. P. 162-165 (in Russian).
- [6] Tkachev K.N. azernaya koordinatno-izmeritel'naya sistema FARO Laser Tracker [Laser Coordinate-Measuring System FARO Laser Tracker]. Kontrol'. Diagnostika [Control. Diagnostics]. 2006. No.12. P. 59-61 (in Russian).
- [7] Grishanov V.N., Oinonen A.A. Sovremennyye lazernyye izmeritel'nyye sistemy V proizvodstvennom tsikle kosmicheskoy tekhniki [Modern laser measuring systems In the production cycle of space technology]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]. 2012. No.1(32). P. 24-35 (in Russian).
- [8] Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moskva: Nauka [Moscow: Science]. 1978. 831 p. (in Russian).

Metrological Standardization of High-Precision Electronic Tacheometers Using a Precision Laser Tracker

T.M. Pimshina ^{*1}, D.M. Arseniev ^{**2}, I.Yu. Pimshin ^{***3}

**Rostov State Transport University (RGUPS), Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,
Rostov-on-Don, Russia 344038*

***Don State Technical University, Socialisticheskaya st., 162, Rostov-on-Don, Russia 344022*

**** LLC «NPF» «Engineering Geodesy», Rostov-on-Don, Russia*

¹ORCID iD: 0000-0002-3776-398X

WoS Researcher ID: ABB-8364-2020

e-mail: pimshina.tat@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-9336-8327

WoS Researcher ID: ABB-9307-2020

e-mail: dima81-07@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-8267-3617

WoS Researcher ID: O-8809-2018

e-mail: ivan.pimschin@yandex.ru

Abstract – The article discusses the issues of increasing the accuracy of measurements which is especially important in the installation and operation of technological equipment. The paper presents a technique for studying the accuracy of determining the rectangular coordinates of the controlled points measured by an electronic tacheometer. It is proposed to use a precision laser tracker for metrological standardization of high-precision electronic tacheometers at short distances (up to 60 m). The results of practical testing of the proposed method of metrological standardization of a high-precision electronic tacheometer are presented.

Keywords: coordinate measuring system; electronic tacheometer; laser tracker; instrumental measurement errors; increased accuracy; determination of rectangular coordinates of controlled points; corrections to the measurement results.