



Методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений

**Н.Х. Голыгин¹✉, В.Г. Лысенко², В.П. Савиных¹,
И.Г. Чугреев¹, В.А. Шилин¹**

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

² Научно-исследовательский центр прикладной метрологии — Ростест,
Москва, Россия

✉ nx_golygin@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Голыгин Н.Х., Лысенко В.Г., Савиных В.П., Чугреев И.Г., Шилин В.А. Методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 187–202. DOI:10.30533/GiA-2025-041.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА мобильные координатные средства измерений, дискретное преобразование Фурье, оптико-электронный комплекс, аффинные преобразования, искусственная нейронная сеть, эксцентриситеты

АННОТАЦИЯ В данной работе описаны методы повышения точности измерений угловых сферических координат мобильными координатными средствами измерений (МКСИ). Представлены методы обработки результатов исследований на оптико-электронном комплексе, связанные с метрологическим обеспечением круговых горизонтальных и вертикальных измерительных систем МКСИ. Рассмотренные в статье методики обработки результатов исследований погрешности электронных тахеометров с применением дискретного преобразования Фурье, аффинных преобразований и искусственной нейронной сети позволили повысить точность измерений горизонтальных и вертикальных углов на оптико-электронном комплексе для испытаний, поверки и калибровки МКСИ. При этом отмечено, что использование конкретной методики обработки результатов измерений зависит от поставленной задачи исследования. Отмечается, что в случае ортогональности осей поворотного стола и призмы горизонтальной плоскости при поверке МКСИ достаточно использовать метод аффинных преобразований, так как здесь автоматически устраняется влияние эксцентриситетов расположения МКСИ над призмой и самой призмы

на поворотном столе. Если же результаты исследований не в допуске, то может быть использована методика обработки результатов исследований с применением гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье, которая позволяет проанализировать результаты измерений, выявить, к чему относятся погрешности измерений (к компаратору или МКСИ), после чего принимается решение об устранении соответствующих гармоник (может быть построена линия регрессии, характеризующая систематическую погрешность измерений МКСИ).

1 Введение

В 1924 году СССР по Женевской конвенции для обеспечения единства измерений были переданы 4 инварных трехметровых жезла первого разряда. Один из них был направлен в Ташкент, другой — в Тбилиси, а два были переданы в Московский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК).

В 1925 году по приказу начальника государственного технического бюро «Аэрофотосъемка» М.Д. Бонч-Бруевича в МИИГАиК было начато строительство оптико-механического линейного компаратора, на котором выполнялись практически до конца прошлого столетия только поверки инварных проволок длиной 24 м, использовавшихся при проложении высокоточных геодезических сетей и проверки длин эталонных базисов.

Переданные МИИГАиК эталонные жезлы раз в два года поверялись во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в Ленинграде (Санкт-Петербурге), при этом перерыв был только во время блокады Ленинграда. До 1935 года длина жезлов линейно увеличивалась, после чего она стабилизировалась на размере 3 000,028 мм.

До конца прошлого столетия поверка инварных проволок выполнялась по договорам с ФГБУ «Ростест — Москва». В 2003 году в связи с отсутствием необходимости поверки инварных проволок руководством МИИГАиК было принято решение о модернизации линейного оптико-механического компаратора с целью создания оптико-электронного 3D-комплекса (ОЭК) для метрологического обеспечения мобильных координатных средств измерений (МКСИ). В 2008 году управлением метрологии Росстандарта на основе материальной базы МИИГАиК был утвержден совместный центр эталонов «ВНИИМС — МИИГАиК» с целью повышения точности измерений МКСИ пространственных координат в геодезии, а также геометрических параметров поверхностей сложной формы в других отраслях отечественной промышленности (лазерных трекеров, радаров, электронных тахеометров, измерительных систем с цифровыми нивелирами и других координатных средств измерений).

При метрологическом обеспечении МКСИ для выявления погрешности измерений ими сферических и декартовых координат во множестве точек задекларированного пространства измерений необходимо скомпенсировать методические и инструментальные погрешности эталонов. Особую сложность представляет компенсация погрешностей эталонов угла. Некоторые из перечисленных МКСИ, используемые в качестве средств измерений (СИ), не имеют уровней и центриров, при этом в процессе обработки результатов поверки или калибровки СИ необходимо компенсировать погрешности, связанные с эксцентриситетами расположения осей исследуемого СИ и эталона, наклонами вертикальной оси, отклонением от окружности вращения поворотного стола и др.

В современных, особенно критических, технологиях, во-первых, резко уменьшились допуски на изготовление как отдельных деталей, так и изделий в целом, во-вторых, например, при изготовлении турбинных лопаток требуется знание координат более 3000 точек. Поэтому иностранные методики исследований, выявляющие погрешности измерений, как правило, в небольшом количестве точек и с перестановкой МКСИ [1–3], не обеспечивают точность измерений в нормированных диапазонах измерений. При этом выявляется только погрешность

измерений длины линии в пространстве, а не пространственные сферические или прямоугольные координаты. Кроме того, в связи с санкциями, отсутствием отечественных эталонных лазерных интерферометров и другими ограничениями на импорт задача повышения точности эталонных СИ становится особенно актуальной.

На основе изложенного выше и анализа предыдущих изысканий [4–7] были разработаны конструкции отдельных компараторов ОЭК и программное обеспечение методов обработки результатов исследований горизонтальных и вертикальных угловых измерительных систем МКСИ. В данной работе приведены конструкции отдельных компараторов ОЭК и методики математической обработки результатов исследований горизонтальных и вертикальных измерительных систем 3D-координатных МКСИ.

2 Материалы и методы

2.1 Конструкции отдельных компараторов оптико-электронного комплекса

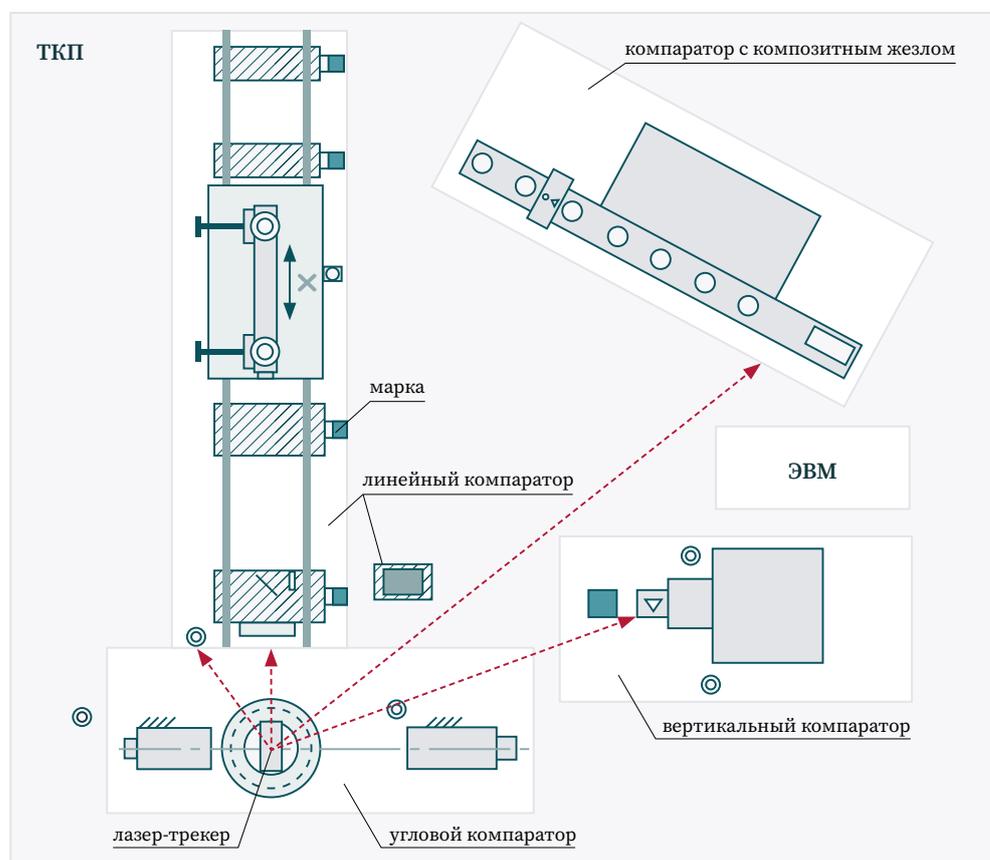
Разработанный ОЭК расположен в термоконстантном помещении. Схема расположения отдельных линейных и угловых компараторов ОЭК показана на рис. 1. Линейный компаратор с эталонным инварным 3-метровым жезлом и лазерным интерферометром используется для исследований линейных измерительных систем МКСИ в пределах до 48 м, угловой компаратор с эталонной 24-гранной призмой 1-го разряда — для исследований погрешности измерений горизонтальной измерительной системы МКСИ с шагом 15°, в компараторе с композитным жезлом и лазерным интерферометром применяется метод трилатерации

Рис. 1 

Схема расположения отдельных компараторов оптико-электронного комплекса

Fig. 1

Arrangement of individual comparators of the optical-electronic complex



с введением предварительно определенных на линейном компараторе поправки на погрешность измерений длины для исследований погрешности измерений горизонтальной измерительной системы МКСИ в пределах 15° на разных установках поворотного стола; вертикальный компаратор с лазерным интерферометром на основе метода трилатерации используется для исследований вертикальной измерительной системы МКСИ в пределах $\pm 50^\circ$; марки, положение которых разнесено по вертикали и горизонтали в пределах заданных производителем углов, служат для контроля ортогональности измеренных МКСИ пространственных координат.

На рис. 2 показана конструкция горизонтального углового компаратора для исследований погрешности измерений горизонтальных измерительных систем МКСИ при определении погрешности измерений по эталонной призме через 15° . На рис. 3 приведена конструкция компаратора для исследований погрешности измерений горизонтальной измерительной системы МКСИ в пределах от нуля до 15° .

Ранее в работе [8] была описана схема ОЭК и методы выполнения исследований в соответствии с указанными выше задачами разработки. В данной статье рассматриваются методы обработки результатов исследований, связанные с метрологическим обеспечением круговых горизонтальных и вертикальных измерительных систем МКСИ.

При разработке ОЭК приняты следующие основные принципы:

- 1) определение погрешности измерений МКСИ обеспечивается во всем рабочем диапазоне при его одной установке;
- 2) возможно исследование точности определения пространственных координат в любой точке пространства измерений;
- 3) погрешность измерений пространственных координат определяется в наиболее востребованном диапазоне до 48 м.

ОЭК позволяет решить следующие основные задачи:

- 1) исследовать погрешности измерений линейных измерительных систем МКСИ при длине радиуса-вектора в диапазоне измерений до 48 м с помощью как интерферометра, так и инварного жезла;

Рис. 2

Внешний вид горизонтального углового компаратора

Fig. 2

Appearance of the horizontal angular comparator

Рис. 3

Внешний вид компаратора с составным стержнем и лазерным интерферометром

Fig. 3

The appearance of comparator with composite rod and laser interferometer



Рис. 4 ➔

Внешний вид вертикального компаратора с лазерным интерферометром

Fig. 4

Appearance of vertical comparator with laser interferometer



- 2) исследовать погрешность угловых горизонтальных (в пределах до 360°) и вертикальных (в пределах $\pm 50^\circ$) измерительных систем МКСИ в любой точке заявленного пространства измерений;
- 3) осуществить контроль ортогональности полученных в результате исследований пространственных координат;
- 4) обеспечить контроль погрешности измерений длины линий в пространстве в соответствии с признанными международными нормативными документами.

На рис. 4 приведена конструкция вертикального компаратора для исследований погрешности измерений вертикальных измерительных систем МКСИ в пределах $\pm 50^\circ$.

В процессе исследований горизонтальных и вертикальных угловых измерительных систем МКСИ на эталонном компараторе применены следующие методы обработки результатов измерений:

- метод на основе дискретного преобразования Фурье, позволяющий выполнить гармонический анализ полученных результатов измерений, а затем устранить влияние эксцентриситетов установки вертикальной оси исследуемого электронного тахеометра и оси многогранной призмы относительно оси поворотного стола путем введения поправок в составе постоянной составляющей $a_0/2$ и коэффициентов ряда Фурье для 1-й гармоники функции погрешности измерений (кроме того, с помощью дискретного преобразования Фурье возможно применение методики моделирования эксцентриситетов для определения их величин);
- метод аффинных преобразований, позволяющий исключить из результатов измерений систематические составляющие погрешности измерений;
- метод с нейросетью, позволяющий уменьшить количество измерений для достижения поставленной цели.

Рассмотренные ниже методики обработки результатов исследований погрешности электронных тахеометров с применением дискретного преобразования Фурье, аффинных преобразований и искусственной нейронной сети позволили повысить точность измерений горизонтальных и вертикальных углов на ОЭК для испытаний, поверки и калибровки МКСИ.

2.2 Методика обработки результатов измерений с применением дискретного преобразования Фурье

Алгоритм обработки результатов измерений с применением дискретного преобразования Фурье описан ранее [8]. Рассмотрим этапы данной методики.

1. На поворотном столе соосно с 24-гранной призмой 1-го разряда устанавливался исследуемый электронный тахеометр. С использованием

автоколлиматора проводилось наведение на каждую грань, начиная с первой. Снимались отсчеты по электронному тахеометру для заданных гранями углов. При расчете погрешности измерений углов поворота призмы в прямом и обратном направлениях вращения стола учитывались поправки из аттестата призмы.

2. Вычислялись погрешности измерений углов электронным тахеометром $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2 \dots \Delta\beta_N$, т. е. определялась дискретная функция $\Delta\beta(k)$, где $k = 1, 2, 3 \dots N$ – порядковый номер грани, $N = 24$ – общее четное число граней.
3. Учитывая, что в данном случае при применении преобразования Фурье дискретная функция погрешности измерений углов электронным тахеометром описывается выражением

$$1 \rightarrow \Delta\beta(k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2} a_n \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sum_{k=1}^{N/2} b_n \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right),$$

определялись постоянная составляющая и коэффициенты ряда Фурье для 1-й гармоники

$$2 \rightarrow \frac{a_0}{2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta\beta(k), \quad a_{nk} = \Delta\beta(k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right), \quad b_{nk} = \Delta\beta(k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right),$$

где $k = 1, 2 \dots N$ – значение текущего отсчета, соответствующего номеру грани призмы;

n – номер гармоники.

С учетом полученных значений коэффициентов находится дискретная функция погрешности измерений углов для амплитуды 1-й гармоники для каждого отсчета

$$3 \rightarrow \Delta\beta_1(k) = \sqrt{a_{1k}^2 + b_{1k}^2},$$

где a_{1k} и b_{1k} – коэффициенты ряда Фурье для 1-й гармоники.

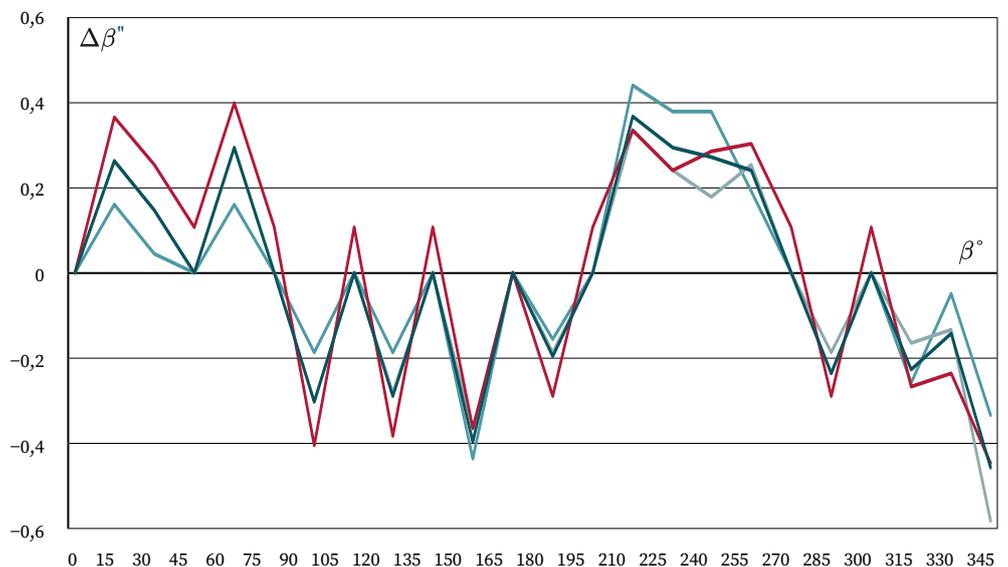
4. Из дискретного ряда значений погрешности измерений углов $\Delta\beta(k)$ вычитаются постоянная составляющая и соответствующие значения дискретной функции для амплитуды 1-й гармоники

$$4 \rightarrow \Delta\beta(k)_{ck} = \Delta\beta(k) - (a_0/2 + \Delta\beta_1(k)).$$

На рис. 5 показаны результаты коррекции погрешности измерений углового компаратора при аттестации его с помощью электронного тахеометра 1-го разряда Leica TC-2000. Измерения выполнялись при прямом и обратном вращении поворотного стола при ориентировании его по каждой из 24 граней призмы.

Рис. 5 →
Результаты коррекции погрешности измерений углового компаратора при аттестации его с помощью электронного тахеометра 1-го разряда Leica TC-2000

Fig. 5
Results of correction of the measurement error of the angular comparator during its certification using an electronic total station of the 1st category Leica TC-2000



Введение поправок в составе постоянной составляющей $a_0/2$ и коэффициентов ряда Фурье для 1-й гармоники $\Delta\beta_1(k)$, рассчитанных с помощью дискретного преобразования Фурье, позволяют устранить влияние эксцентриситетов установки вертикальной оси исследуемого электронного тахеометра и оси многогранной призмы относительно оси поворотного стола.

Анализ результатов исследований (рис. 5) показывает, что после устранения 1-й гармоники погрешность измерений уменьшилась в данном эксперименте в 12 раз и не превысила значения $\pm 0,6''$ (без коррекции $-7,2''$).

При обработке результатов измерений с помощью дискретного преобразования Фурье возможно применение методики моделирования эксцентриситетов для определения их величин. В экспериментальных исследованиях погрешности установки вертикальной оси исследуемого преобразователя электронного тахеометра (эксцентриситет e_{un}) и оси многогранной призмы (эксцентриситет e_{np}) относительно поворотного стола после обработки результатов методом описанного дискретного преобразования Фурье были получены следующие значения эксцентриситетов [6]: $e_{np} = 0,0014$ мм; $e_{un} = 0,0017$ мм. Расчеты с применением гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье выполнены при использовании программы Excel.

На рис. 6 приведен спектр амплитуд гармоник

$$\Delta\beta_n = f(n),$$

где $n \leq N/2$ – номер гармоники, погрешности измерений $\Delta\beta = f(\beta)$, показанной на рис. 5 (кривая 1), определенный с помощью гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье.

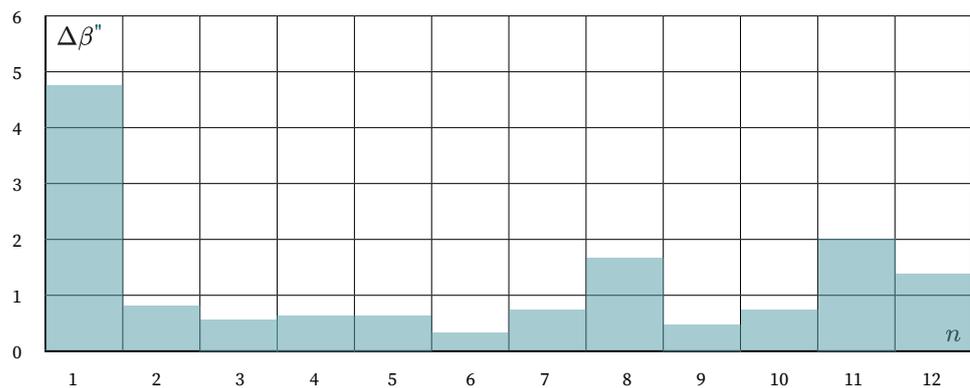
5 >

Рис. 6 >

Спектр амплитуд гармоник $\Delta\beta_n = f(n)$, где $n \leq N/2$ – номер гармоники, погрешности измерений $\Delta\beta = f(\beta)$, показанной на рис. 5 (кривая 1), определенный с помощью гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье

Fig. 6

Harmonic amplitude spectrum $\Delta\beta_n = f(n)$ where $n \leq N/2$ is the harmonic number, measurement error $\Delta\beta = f(\beta)$ shown in Fig. 5 (Curve 1), determined using harmonic analysis based on discrete Fourier transform



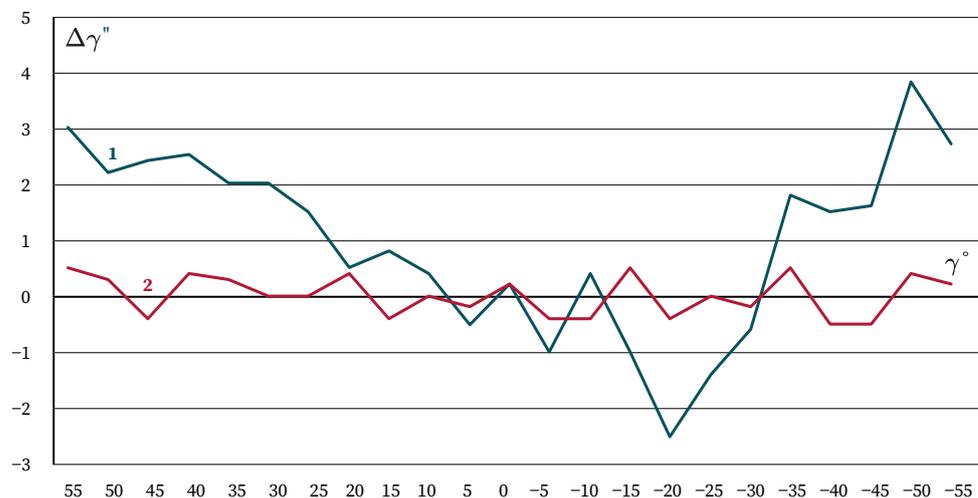
На рис. 7 приведены результаты исследований трилатерационным методом погрешности измерений вертикальной измерительной системы лазерного трекера: кривая 1 – до коррекции, кривая 2 – после обработки результатов измерений методом быстрого преобразования Фурье.

Рис. 7 >

Результаты коррекции трилатерационным методом погрешности измерений вертикальной измерительной системы лазерного трекера

Fig. 7

Results of correction by the trilateration measurement error method of the vertical measuring system of the laser tracker



При обработке результатов измерений была устранена из спектра погрешности измерений 1-я гармоника, связанная с неподвижным положением отражателя трекера на подвижном столике вертикального компаратора. В результате устранения 1-й гармоники погрешность измерений уменьшилась в пять раз и не превысила 1".

Разработанный метод исследований с помощью гармонического анализа может быть использован и для линейных измерений.

2.3 Методика обработки результатов исследований с помощью искусственной нейронной сети

Практические аспекты использования искусственного интеллекта в метрологии рассмотрены, например, в [9]. Основные положения применения средств измерений на базе искусственного интеллекта (искусственной нейронной сети) определяет ГОСТ Р 71561-2024¹.

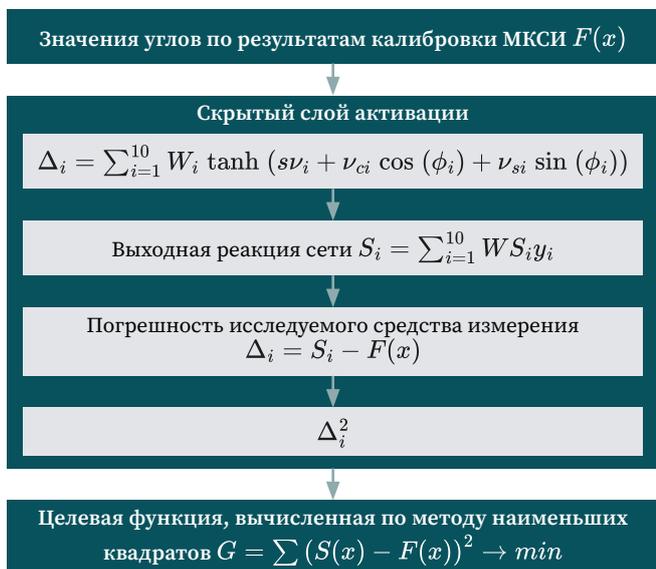
В МИИГАиК была разработана программа с искусственной нейронной сетью для исследований эксцентриситета горизонтальной угловой измерительной системы МКСИ [10]. Задача состоит в поиске наилучшего приближения функции, заданной конечным набором значений [11], когда дана выборка значений аргументов $x_1 \dots x_n$ (установка призмы в градусах) и значения функции $F(x_i)$ (значения измеренных МКСИ в этих точках углов). Требуется найти функцию $Z(x_i)$, ближайшую к функции $F(x_i)$. Для решения задачи использован метод наименьших квадратов, согласно которому целевая функция выражается уравнением вида

$$6 \rightarrow \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - F(x_i))^2 \rightarrow min.$$

Выходная реакция искусственной нейронной сети зависит от наперед заданных допусков на погрешность измерений. Для активации выходных сигналов нейронов использована функция в виде гиперболического тангенса, которая по сравнению, например, с сигмоидой позволяет при меньшем количестве измерений достичь требуемого результата и сохранить положительные результаты, находящиеся на границе наперед заданного допуска. Погрешность МКСИ вычисляется как

$$\Delta_i = Z(x_i) - F(x_i).$$

Рис. 8  7 
 Схема нейронной сети
 Fig. 8
 Neural network diagram



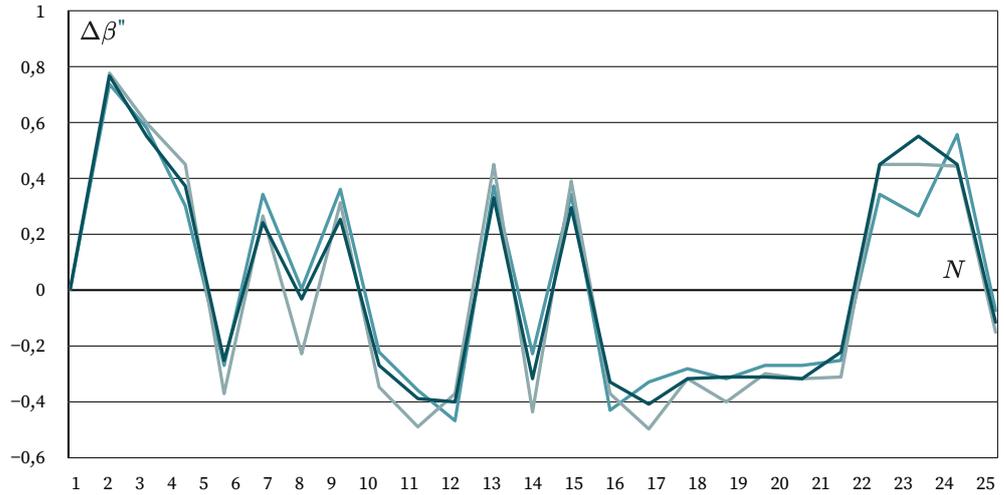
Для компенсации влияния эксцентриситета горизонтальной угловой измерительной системы МКСИ на основе предложенной методики обработки результатов исследований с искусственной нейронной сетью была разработана рабочая программа для ЭВМ. Схема нейросети приведена на рис. 8.

Результаты исследований эталонного тахеометра 1-го разряда Leica TC-1000 с применением разработанной программы приведены на рис. 9, из которого видно, что при заданном допуске 1,5" погрешность измерений в основном не превысила ±0,5".

1 ГОСТ Р 71561-2024. Средства измерений на основе искусственного интеллекта. Состав, структура и области применения. Основные положения. М.: Российский институт стандартизации, 2024. 14 с.

Рис. 9  Погрешность измерений, вычисленная искусственной нейронной сетью, N – номер грани призмы

Fig. 9 Measurement error calculated by the artificial neural network, N is the number of the prism face



2.4 Методика обработки результатов исследований с помощью аффинных преобразований

Аффинные преобразования используют в случае перпендикулярности осей поворотного стола и контрольной призмы плоскости горизонта. Проверить параллельность поворотного стола достаточно просто. Для проверки этого условия необходимо выполнить измерения по всем граням контрольной призмы на один отражатель. Полученные высоты по каждой грани контрольной призмы не должны превышать средней квадратической погрешности измерений углов γ $\sigma_{\gamma_{пред}}$ для данного расстояния S до отражателя:

8 

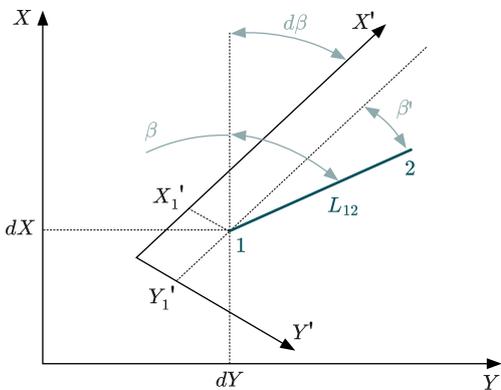
$$\sigma_{h_{пред}} \geq \frac{S\sigma_{\gamma_{пред}}}{\rho}.$$

Тогда плоскость поворотного стола параллельна горизонтальной поверхности. В данном случае целесообразно использовать аффинные преобразования². С целью компенсации систематической погрешности измерений при определении горизонтальных углов МКСИ разработана программа для ЭВМ для ее вычисления, основанная на выполнении измерений исследуемым МКСИ координат указанных выше марок-гнезд по граням эталонной призмы через 15° . По каждой грани измеряются координаты марок, после чего выполняется их приведение: доворот по углу β (рис. 10) в единую систему координат, совпадающую с измерениями по первой грани призмы (аффинные преобразования координат). Разность между углами доворота горизонтальных углов β и соответствующими углами между гранями эталонной призмы свидетельствует о погрешности угловой измерительной системы исследуемого МКСИ.

Вычисления выполняются по следующим формулам:

Рис. 10  Схема поворота системы координат в плоскости XY

Fig. 10 The scheme of rotation of the coordinate system in the XY plane



9 

$$\operatorname{tg} \beta' = (y_2' - y_1') / (x_2' - x_1'),$$

10 

$$\operatorname{tg} \beta = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1),$$

11 

$$d\beta = \beta' - \beta,$$

12 

$$x_i = (x_i' - x_0') \times \cos d\beta - (y_i' - y_0') \times \sin d\beta + x_0,$$

² Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. М.: ДМК Пресс, 2018. 718 с.

- 13 ➤ $y_i = -(x_i' - x_0') \times \sin d\beta - (y_i' - y_0') \times \cos d\beta + y_0,$
- 14 ➤ $z_i = (z_i' - z_0') + z_o,$
- 15 ➤ $L_i = ((x_i' - x_1)^2 + (y_i' - y_1)^2)^{1/2},$
- 16 ➤ $\beta_i' = \arctg((y_i' - y_1)/(x_i' - x_1)),$
- 17 ➤ $\beta_i = \beta_I' + d\beta,$
- 18 ➤ $dx_i = L_i \times \cos \beta_i,$
- 19 ➤ $dy_i = L_i \times \sin \beta_i,$
- 20 ➤ $x_i = x_{01} + dx,$
- 21 ➤ $y_i = y_{01} + dy,$
- 22 ➤ $z_i = (z_i' - z_0') + z,$

где $(x_i' - x_0'), (y_i' - y_0')$ – приращения координат точки в системе координат $X'Y'Z'$;

x_0', y_0' – координаты, принятые за начало системы координат $X'Y'Z'$;

$d\beta$ – угол доворота осей координат;

X_0, Y_0 – координаты точки X_0', Y_0' в системе координат XYZ .

За начало систем координат XYZ и $X'Y'Z'$ в процессе пересчета приняты координаты первой точки. Для преобразования высот точек снимаемого объекта достаточно выполнить параллельный перенос из условной системы координат $X'Y'Z'$ в систему XYZ , так как ось Z ортогональна плоскости XY :

- 23 ➤ $z_i = (z_i' - z_0') + z_o,$

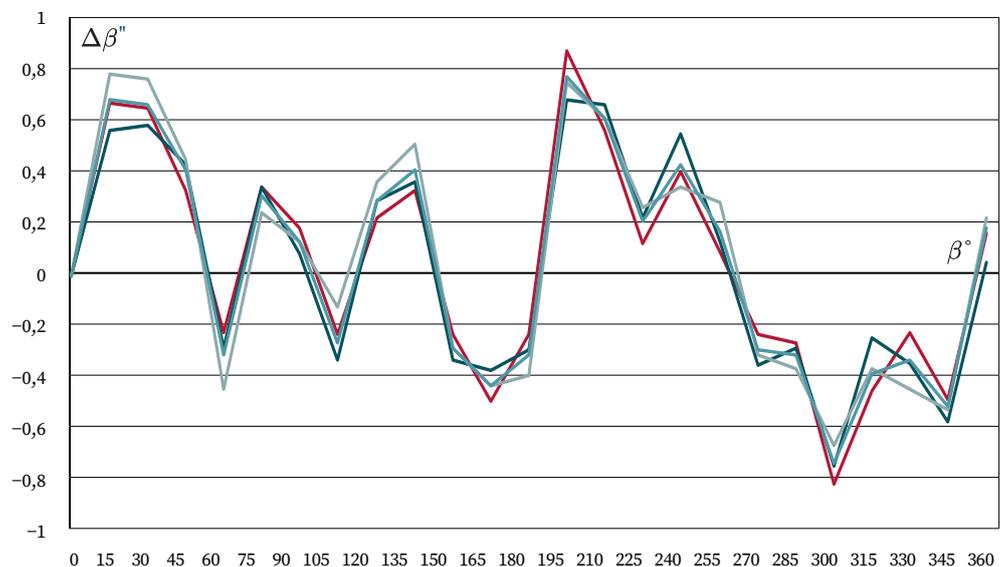
где z_o – высота точки X_0', Y_0' в системе координат XYZ .

На рис. 11 приведены графики зависимости погрешности измерений при аттестации углового горизонтального компаратора с помощью эталонного тахеометра 1-го разряда Leica TC-1000.

Применение предложенной методики обработки результатов исследований с помощью аффинных преобразований позволило уменьшить погрешность углового компаратора до величины, не превышающей $\pm 0,8''$, на уровне дискретности отсчитывания по электронному дисплею тахеометра.

Рис. 11 ➤
Зависимости погрешности измерений при аттестации углового горизонтального компаратора с помощью эталонного тахеометра 1-го разряда Leica TC-1000 после коррекции с использованием аффинных преобразований

Fig. 11
Dependences of measurement error during attestation of an angular horizontal comparator using a Leica TC-1000 1st-class reference total station after correction using affine transformations



3 Результаты и обсуждение

Рассмотренные в данной статье методики обработки результатов измерений горизонтальных и вертикальных углов МКСИ при применении дискретного преобразования Фурье, аффинных преобразований и искусственной нейронной сети позволили повысить точность измерений углов в задекларированных производителями диапазонах измерений. При этом использование конкретной методики обработки результатов измерений зависит от поставленной задачи исследований. Например, в случае перпендикулярности осей поворотного стола и призмы горизонтальной плоскости при поверке МКСИ зачастую достаточно использовать метод аффинных преобразований, так как здесь автоматически устраняется влияние эксцентриситетов расположения МКСИ над призмой и самой призмы на поворотном столе. При допустимых результатах погрешности измерений исследования могут быть закончены.

Если результаты исследований не в допуске, тогда может быть использована методика обработки результатов исследований с применением гармонического анализа на основе дискретного преобразования Фурье, которая позволяет проанализировать результаты измерений, выявить, к чему относятся погрешности измерений (к компаратору или МКСИ), после чего принять решение об устранении соответствующих гармоник (может быть построена линия регрессии, характеризующая систематическую погрешность измерений МКСИ).

Разработанная искусственная нейронная сеть с использованием для активации выходных сигналов нейронов гиперболического тангенса позволяет для достижения требуемого результата значительно уменьшить количество циклов измерений, что снижает трудоемкость исследований.

Разработанные методы воспроизведения эталонного горизонтального угла β на основе 24-гранной призмы 1-го разряда позволяют (за счет компенсации систематических погрешностей измерений на основе представленных выше методик) исследовать погрешности измерений горизонтальных измерительных систем МКСИ, обеспечивая измерение горизонтальных углов в пределах $0 \div 360^\circ$ с погрешностью измерений не более $0,5''$, что в три раза меньше заявленной погрешности измерений угловых измерительных систем известных мобильных 3D-МКСИ, работающих в сферической системе координат, и являются достаточными для точности измерений МКСИ.

На разработанном горизонтальном линейном компараторе трилатерационный метод воспроизведения горизонтальных эталонных углов позволяет исследовать горизонтальные угловые измерительные системы МКСИ (измеряющие горизонтальную сферическую координату β) с помощью композитного жезла или лазерного интерферометра, предварительно откалиброванного по длине МКСИ с короткопериодической погрешностью измерений не более $0,5''$.

На разработанном вертикальном линейном компараторе трилатерационный метод воспроизведения вертикальных углов позволяет исследовать вертикальные угловые измерительные системы МКСИ, измеряющие вертикальную сферическую угловую координату γ по предварительно откалиброванному по длине МКСИ, выявить (в том числе и короткопериодическую — циклическую) составляющую погрешности измерений вертикальных углов γ в заявленных производителем пределах измерений $+77^\circ / -52^\circ$ с погрешностью измерений не более $0,5''$.

4 Выводы

В статье рассмотрены методы повышения точности измерений при обработке результатов измерений пространственных координат. Обработка результатов одних и тех же измерений разными методами позволила проконтролировать эффективность рассмотренных методик с помощью полученных количественных

оценок результатов уменьшения погрешности измерений после введения поправок для компенсации ее систематических составляющих. При этом показано, что использование конкретной методики обработки результатов измерений зависит от поставленной задачи исследований.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Донченко С.И., Денисенко О.В., Сильвестров И.С. и др. Государственный первичный специальный эталон единицы длины ГЭТ 199-2024: обеспечение единства измерений высокоточных тахеометров и их аналогов в режиме трехмерных измерений // Измерительная техника. 2024. № 1. С. 12–18. DOI:10.32446/0368-1025it.2024-1-12-18.
2. Донченко С.И., Мазуркевич А.В., Лесниченко В.И. Метрологически значимое программное обеспечение для оценки точности характеристик наземных лазерных координатно-измерительных систем. Первичная оценка функциональных возможностей // Измерительная техника. 2024. № 12. С. 14–22. DOI:10.32446/0368-1025it.2024-12-14-21.
3. Сильвестров И.С., Печерица Д.С., Мазуркевич А.В. и др. Метрологическое обеспечение координатных и координатно-временных средств измерений в Российской Федерации // Геопрофи. 2023. № 6. С. 8–14.
4. Желтко Ч.Н., Гура Д.А., Шевченко Г.Г. и др. Экспериментальные исследования погрешностей измерений горизонтальных углов электронными тахеометрами // Метрология. 2014. № 2. С. 17–20.
5. Гура Д.А. Разработка методов исследования электронных тахеометров в условиях производства для оценки и повышения точности измерения горизонтальных углов: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар, 2016. 181 с.
6. Yanggiu Xia, Zhilin Wu, Ming Huang, et al. An improved angle calibration method of a high-precision angle comparator // Metrology and Measurement Systems. 2021. Vol. 28. No. 1. P. 181–190. DOI:10.24425/mms.2021.136001.
7. Кузин А.А., Петров В.В., Пештиев А.А. Геодезическое обеспечение выверки формы отражающей поверхности главного зеркала радиотелескопа с применением лазерных трекеров // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28. № 1. С. 22–30. DOI:10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.
8. Голыгин Н.Х., Шилин В.А., Осипова Н.С. и др. Метод оценки и устранения влияния эксцентриситетов на компараторе для исследований погрешности измерений горизонтальных углов мобильными координатными средствами измерений // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65. № 5. С. 609–614. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-609-614.
9. Кузин А.Ю., Крошкин А.Н., Исаев Л.К. и др. Практические аспекты применения искусственного интеллекта в метрологии // Измерительная техника. 2023. № 9. С. 66–72. DOI:10.32446/0368-1025it.2023-9-66-72.
10. Хиноева О.Б. Новые возможности повышения точности аттестации геодезических приборов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2005. № 5. С. 136–142.
11. Хиноева О.Б. Разработка и применение нейросетевых алгоритмов учета погрешностей эталонных средств при калибровке угломерных геодезических приборов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 136 с.

АВТОРЫ**Голыгин Николай Христофорович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра технологии оптического приборостроения,

факультет оптического приборостроения

канд. техн. наук, доцент

Лысенко Валерий Григорьевич

✉ lysenko@vniims.ru

ФБУ «Научно-исследовательский центр прикладной метрологии — Ростест»,

Москва, Россия

д-р техн. наук, профессор

🆔 0000-0001-7410-7028

Савиных Виктор Петрович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра аэрокосмических съемок, геодезический факультет
д-р техн. наук, профессор
 0000-0002-3259-6721

Чугреев Игорь Григорьевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра геодезии, геодезический факультет
д-р техн. наук, профессор

Шилин Виктор Афанасьевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра оптико-электронных приборов, факультет оптического приборостроения
канд. техн. наук, доцент

Поступила 07.04.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



Methods for improving the accuracy of angular spherical coordinates measurements of mobile coordinate measurement devices

Nikolay H. Golygin¹✉, Valery G. Lysenko², Victor P. Savinykh¹, Igor G. Chugreev¹, Victor A. Shilin¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

² FBU PM "Rostest", Moscow, Russia

✉ nx_golygin@mail.ru

CITATION Golygin NH, Lysenko VG, Savinykh VP, Chugreev IG, Shilin VA. Methods for improving the accuracy of angular spherical coordinates measurements of mobile coordinate measurement devices. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 187–202. DOI:10.30533/GiA-2025-041.

KEYWORDS optical-electronic complex, mobile coordinate measuring instruments, discrete Fourier transform, affine transformations, artificial neural network, eccentricities

ABSTRACT This paper describes methods for improving the accuracy of measurements of angular spherical coordinates by mobile coordinate measuring instruments (MKS). Methods of processing research results on an optoelectronic complex related to the metrological support of circular horizontal and vertical measuring systems of the ICSI are presented. The methods of processing the results of research on the error of electronic total stations using discrete Fourier transforms, affine transformations and an artificial neural network have improved the accuracy of measurements of horizontal and vertical angles on an optoelectronic complex for testing, verification and calibration of ICSI. At the same time, it is noted that the use of a specific measurement results processing technique depends on the research objective. It is noted that in the case of orthogonality of the axes of the rotary table and the prism of the horizontal plane, when checking the ICSI, it is sufficient to use the affine transformation method, since here the influence of the eccentricities of the ICSI location above the prism and the prism itself on the rotary table is automatically eliminated. If the research results are not acceptable, then a technique for processing research results using harmonic analysis based on the discrete Fourier transform can be used, which allows you to analyze the measurement results, identify what the measurement errors relate to (comparator or ICSI), after which a decision is made to eliminate the corresponding harmonics (a regression line can be constructed, characterizing the systematic measurement error of the ICSI).

- REFERENCES**
1. Donchenko SI, Denisenko OV, Silvestrov IS, et al. Gosudarstvennyj pervichnyj special'nyj jetalon edinicy dliny GJeT 199-2024: obespechenie edinstva izmerenij vysokotochnnyh taheometrov i ih analogov v rezhime trehmernyh izmerenij [The state primary special standard of the unit of length GET 199-2024: ensuring the uniformity of measurements of high-precision total stations and their analogues in the mode of three-dimensional measurements]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2024;1: 12–18. DOI:10.32446/0368-1025it.2024-1-12-18.
 2. Donchenko SI, Mazurkevich AV, Lesnichenko VI. Metrologicheski znachimoe programmnoe obespechenie dlja ocenki tochnosti harakteristik nazemnyh lazernyh koordinatno-izmeritel'nyh sistem. Pervichnaja ocenka funkcional'nyh vozmozhnostej [Metrologically significant software for evaluating the accuracy of characteristics of ground-based laser coordinate measuring systems. Initial assessment of functionality]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2024;12: 14–22. (In Russian). DOI:10.32446/0368-1025it.2024-12-14-21.
 3. Silvestrov IS, Pecheritsa DS, Mazurkevich AV, et al. Metrologicheskoe obespechenie koordinatnyh i koordinatno-vremennyh sredstv izmerenij v Rossijskoj Federacii [Metrological support of coordinate and time-coordinate measuring instruments in the Russian Federation]. *Geoprofi*. 2023;6: 8–14. (In Russian).
 4. Zheltko ChN, Gura DA, Shevchenko GG, et al. Jeksperimental'nye issledovanija pogreshnostej izmerenij gorizonta'nyh uglov jelektronnymi taheometrami [Experimental studies of measurement errors of horizontal angles by electronic total stations]. *Metrology*. 2014;2: 17–20. (In Russian).
 5. Gura DA. *Razrabotka metodov issledovanija jelektronnyh taheometrov v uslovijah proizvodstva dlja ocenki i povyshenija tochnosti izmerenija gorizonta'nyh uglov* [Development of research methods for electronic total stations in production conditions to evaluate and improve the accuracy of measuring horizontal angles] [dissertation]. Krasnodar; 2016. 181 p. (In Russian).
 6. Yanggiu Xia, Zhilin Wu, Ming Huang, et al. An improved angle calibration method of a high-precision angle comparator. *Metrology and Measurement Systems*. 2021;28(1): 181–190. DOI:10.24425/mms.2021.136001.
 7. Kuzin AA, Petrov VV, Peftiev AA. Geodezicheskoe obespechenie vyverki formy otrazhajushhej poverhnosti glavnogo zerkala radioteleskopa s primeneniem lazernyh trekerov [Geodetic support for the alignment of the shape of the reflecting surface of the main mirror of a radio telescope using laser trackers]. *Vestnik SSUGT*. 2023;28(1): 22–30. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2023-28-1-22-32.
 8. Golygin NH, Shilin VA, Osipova NS, et al. Metod ocenki i ustraneniya vlijaniya jekscentrisitetov na komparatore dlja issledovanij pogreshnosti izmerenij gorizonta'nyh uglov mobil'nymi koordinatnymi sredstvami izmerenij [A method for assessing and eliminating the influence of eccentricities on a comparator for studying the measurement error of horizontal angles by mobile coordinate measuring instruments]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(5): 609–614. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-609-614.
 9. Kuzin AYu, Kroshkin AN, Isaev LK, et al. Prakticheskie aspekty primeneniya iskusstvennogo intellekta v metrologii [Practical aspects of the application of artificial intelligence in metrology]. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2023;9: 66–72. (In Russian). DOI:10.32446/0368-1025it.2023-9-66-72.
 10. Hinoeva OB. Novye vozmozhnosti povyshenija tochnosti attestacii geodezicheskikh priborov [New opportunities for improving the accuracy of geodetic instrument certification]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2005;5: 136–142. (In Russian).
 11. Hinoeva OB. *Razrabotka i primenenie nejrosetevyh algoritmov ucheta pogreshnostej jetalonnyh sredstv pri kalibrovke uglomernyh geodezicheskikh priborov* [Development and application of neural network algorithms for accounting for errors of reference tools in the calibration of angle-measuring geodetic instruments] [dissertation]. Moscow; 2007. 136 p. (In Russian).

AUTHORS **Nikolay H. Golygin**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Optical Instrumentation Technology, Faculty of Optical Instrumentation
 PhD in Engineering, Associate Professor

Valery G. Lysenko

✉ lysenko@vniims.ru

Scientific Research Center of Applied Metrology – Rostest, Moscow, Russia
Dr. of Sci. (Engineering), Professor

🆔 0000-0001-7410-7028

Viktor P. Savinykh

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Aerospace Surveying, Faculty of Geodesy

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

🆔 0000-0002-3259-6721

Igor G. Chugreev

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Geodesy, Faculty of Geodesy

Dr. of Sci. (Engineering), Professor

Viktor A. Shilin

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

Department of Optoelectronic Devices, Faculty of Optical Instrumentation

PhD in Engineering, Associate Professor

Submitted: April 07, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.