

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.5

DOI 10.52928/2070-1683-2023-34-2-77-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА АЛИДАДЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ

канд. техн. наук К.И. МАРКОВИЧ,

канд. техн. наук И.П. ШЕВЕЛЕВ,

А.С. ИВАШНЕВА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

П.С. ОСТРОУШКО

(Дорожно-строительный трест № 5, Минск)

В статье представлены результаты исследования эксцентриситета алидады современных электронных тахеометров. В качестве исследуемых были выбраны точные и высокоточные электронные тахеометры, обладающие односторонней и двусторонней системой отсчитывания по лимбу. Оба типа приборов были снабжены штрихкодowymi лимбами абсолютного типа. Эксцентриситет алидады определялся по колебанию коллимационной ошибки, полученной при различных ориентировках алидады. Результаты исследований показали, что максимальное значение эксцентриситета алидады у всех исследуемых тахеометров в два и более раз превышает заявленную производителем точность угловых измерений.

Ключевые слова: электронный тахеометр, эксцентриситет алидады и лимба, центр делений лимба, ось вращения алидады, односторонняя и двусторонняя системы отсчитывания, коллимационная ошибка.

Введение. Как известно из теории геодезического приборостроения [1–3], вращение лимба и алидадной части угломерного геодезического оборудования (теодолита, тахеометра) должно происходить вокруг общей вертикальной оси, называемой главной осью вращения. В силу наличия погрешностей центрирования лимба и алидады, несовпадения геометрического центра нанесения делений на лимб с осью вращения лимба, наличия технологических зазоров в осевой системе (для смазки) возникают эксцентриситет алидады и эксцентриситет лимба.

Несовпадение центра делений лимба O с центром вращения алидады A является эксцентриситетом алидады ϵ . Соответственно, несовпадение центра делений лимба O с осью вращения лимба L – эксцентриситетом лимба δ (рисунок 1).

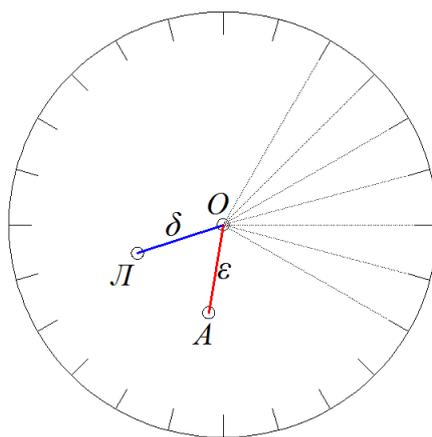


Рисунок 1. – Лимб с центром делений O и осями вращения лимба L и алидады A

Согласно рисунку 1 можно отметить, что при различной ориентировке алидады погрешности в отсчетах, связанные с эксцентриситетом алидады, будут меняться. Соответственно, эксцентриситеты окажут максимальное влияние на отсчет, когда центр делений лимба O и центр вращения алидады A попадут на одну прямую с центром вращения лимба L (рисунок 2).



Рисунок 2. – Взаимная ориентировка лимба и алидады, при которой эксцентриситеты оказывают наибольшее влияние на отсчет

Из теории эксцентриситета известно, что от погрешности за эксцентриситет алидады свободен отсчёт, взятый по двум диаметрально противоположным отсчетным приспособлениям (приборы с двусторонней системой отсчитывания), либо среднее из отсчетов, взятых при двух положениях зрительной трубы (для приборов с односторонней системой отсчитывания). Однако так как вертикальная ось опирается на шарикоподшипник и вследствие возможной неточности диаметров шариков и зазоров между осью и втулкой описывает коническую поверхность, то для полного исключения влияния эксцентриситета при измерении горизонтальных углов необходимо выполнять четное количество приемов с соответствующей перестановкой лимба, что в свою очередь вносит погрешности за эксцентриситет лимба, которые устраняются осреднением значения угла из четного количества угловых приемов. Именно такая методика и предусмотрена при выполнении угловых измерений в ГКНП 01-002-2010¹.

Следует отметить, что при использовании оптических теодолитов перестановка лимба не вызывает трудностей, так как она конструктивно возможна. При использовании же электронных тахеометров нарушается методика угловых измерений, так как лимб конструктивно неподвижен. Из-за данной особенности невозможно полностью устранить влияние эксцентриситета алидады на результаты угловых измерений. Несмотря на то, что все современные электронные тахеометры имеют двустороннюю систему отсчитывания по лимбу и встроенное программное обеспечение устраняет ряд ошибок, в том числе и ошибку за эксцентриситет, ошибка, связанная с неточностью изготовления шарикоподшипника осевой системы, не устраняется ни программно, ни методически. Таким образом, возникает необходимость исследования электронных тахеометров на наличие и величину ошибки, связанной с эксцентриситетом и его остаточным влиянием, связанным с неточностью изготовления шарикоподшипника осевой системы.

Основная часть. Классическая методика исследования эксцентриситета оптического теодолита, основанная на взятии двух отсчетов, свободного и зависимого от эксцентриситета [1–3], при различных установках алидады не может быть использована для электронных тахеометров из-за их конструктивных особенностей. Для исследования эксцентриситета электронных тахеометров существуют стационарные метрологические комплексы геодезической метрологии, однако их использование весьма ограничено из-за их дороговизны и громоздкости, что отрицательно сказывается на оперативности данного исследования, имеющего практическое значение. Из теории эксцентриситета известно, что эксцентриситет алидады можно определить по колебанию коллимационной ошибки, полученной при различных установках алидады. В электронных тахеометрах с двусторонней системой отсчитывания будет иметь место лишь остаточное влияние эксцентриситета, связанное, как уже упоминалось ранее, с неточностью изготовления шарикоподшипника осевой системы. При работе тахеометром с односторонней системой отсчитывания при одном положении вертикального круга угловой элемент эксцентриситета будет оказывать полное влияние на измеренный угол.

Исходя из всего выше сказанного методика исследования эксцентриситета электронных тахеометров заключалась в определении его по колебанию коллимационной ошибки при различных установках алидады. Зависимость эксцентриситета алидады ε и коллимационной ошибки c представлена в формуле (1)²

$$\varepsilon + c = \frac{KL - KP \pm 180^\circ}{2}, \quad (1)$$

где KL, KP – отсчеты при двух положениях зрительной трубы.

Коллимационная ошибка определялась на 12-ти различных ориентировках алидады электронных тахеометров, равномерно расположенных по окружности через 30° (рисунок 3). Измерения выполнялись в лабораторных условиях с тумб (рисунок 4), имеющих принудительное центрирование на специально наклеенные на стенах визирные марки. Коллимационная ошибка по каждому из направлений определялась шесть раз, после чего осреднялась.

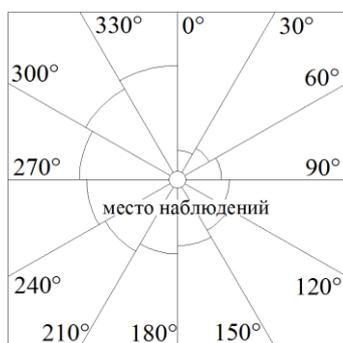


Рисунок 3. – Схема измерений



Рисунок 4. – Тумба для установки прибора

¹ ГКНП 01-002-2010. Техническая инструкция по созданию и реконструкции геодезических сетей в населенных пунктах. – Минск: БелНИЦзем, 2010. – 63 с.

² Староверов С.В. Разработка компактных средств геодезической метрологии для оперативной поверки и исследований нивелиров и тахеометров: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.32. – М., 2018. – 108 л.

В качестве исследуемых приборов были выбраны точные и высокоточные электронные тахеометры с односторонней и двусторонней системой отсчитывания. Оба типа приборов были снабжены штрихкодowymi лимбами абсолютного типа. В качестве точного тахеометра с односторонней системой отсчитывания выступал Spectra Precision FOCUS 4 5" с угловой точностью пять секунд. В качестве тахеометров с двусторонней системой отсчитывания – Trimble M3 DR TA 5", Trimble M3 DR TA 2" (точные пяти- и двухсекундные тахеометры соответственно) и Leica TCR 1201 1" (высокоточный тахеометр с угловой точностью одна секунда). Характеристики указанных тахеометров представлены в таблице 1^{3, 4, 5}.

Таблица 1. – Характеристики и внешний вид исследуемых тахеометров

 <p>Spectra Precision FOCUS 4 5"</p>	СКП измерения горизонтального угла	5"
	Датчики считывания ГУ / ВУ	с одной стороны лимба
	СКП измерения расстояния: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	± (3 мм + 2 ppm); ± (5 мм + 2 ppm)
	Дальность измерений: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	до 5 000 м; до 300 м
	Диапазон работы компенсатора	± 3'
	Пыле-влагозащитенность	IP56
 <p>Trimble M3 DR TA 5"</p>	СКП измерения горизонтального угла	5"
	Датчики считывания ГУ / ВУ	с двух сторон лимба
	СКП измерения расстояния: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	± (2 мм + 2 ppm); ± (3 мм + 2 ppm)
	Дальность измерений: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	до 3 000 м; до 500 м
	Диапазон работы компенсатора	± 3,5'
	Пыле-влагозащитенность	IP66
 <p>Trimble M3 DR TA 2"</p>	СКП измерения горизонтального угла	2"
	Датчики считывания ГУ / ВУ	с двух сторон лимба
	СКП измерения расстояния: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	± (2 мм + 2 ppm); ± (3 мм + 2 ppm)
	Дальность измерений: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	до 3 000 м; до 500 м
	Диапазон работы компенсатора	± 3,5'
	Пыле-влагозащитенность	IP66
 <p>Leica TCR 1201 1"</p>	СКП измерения горизонтального угла	1"
	Датчики считывания ГУ / ВУ	с двух сторон лимба
	СКП измерения расстояния: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	± (2 мм + 2 ppm); ± (1 мм + 1,5 ppm)
	Дальность измерений: – в отражательном режиме; – в безотражательном режиме	до 3 500 м; до 150 м
	Диапазон работы компенсатора	± 4'
	Пыле-влагозащитенность	IP54

³ Руководство по эксплуатации Leica TCR 1201. Leica Geosystems. – 244 с.

⁴ Руководство по эксплуатации Trimble M3 DR. Trimble. – 65 с.

⁵ Электронный тахеометр Focus 4. Руководство пользователя. Spectra Precision. – 134 с.

Перед выполнением исследования все тахеометры прошли калибровку с использованием встроенного программного обеспечения. Также стоит отметить, что электронные тахеометры Trimble M3 DR TA 2" и Leica TCR 1201 1" (рисунок 5) прошли государственную поверку средств измерений. Наведение на визирные марки (рисунок 6) выполнялось одним наблюдателем при одинаковых внешних условиях.

Результаты измерений электронными тахеометрами представлены в таблицах 2–5. Графики колебаний коллимационных ошибок представлены на рисунках 7–10.



Рисунок 5. – Leica TCR 1201 1" на тумбе с принудительным центрированием



Рисунок 6. – Визирная марка, используемая для наведения

Таблица 2. – Результаты измерений электронным тахеометром Spectra Precision FOCUS 4 5"

Ориентировка алидады	Значение коллимационной ошибки c в приемах, "						Среднее значение c , "
	1 прием	2 прием	3 прием	4 прием	5 прием	6 прием	
0°	3,0	7,0	6,0	1,0	5,0	3,0	4,2
30°	4,0	6,0	2,0	-2,0	1,0	5,0	2,7
60°	5,0	-3,0	-2,0	3,0	-3,0	4,0	0,7
90°	-3,0	1,0	4,0	-2,0	2,0	4,0	1,0
120°	2,0	7,0	7,0	5,0	2,0	4,0	4,5
150°	8,0	5,0	6,0	7,0	7,0	9,0	7,0
180°	11,0	9,0	14,0	9,0	10,0	15,0	11,3
210°	10,0	12,0	8,0	7,0	10,0	9,0	9,3
240°	8,0	10,0	6,0	4,0	7,0	5,0	6,7
270°	7,0	8,0	5,0	6,0	4,0	4,0	5,7
300°	4,0	1,0	5,0	4,0	6,0	3,0	3,8
330°	5,0	3,0	-1,0	2,0	4,0	4,0	2,8

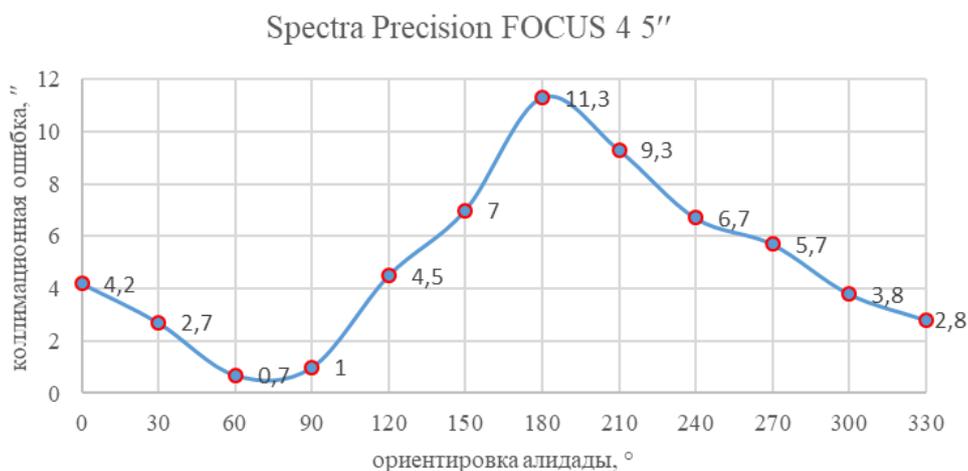


Рисунок 7. – Колебания коллимационной ошибки тахеометра Spectra Precision FOCUS 4 5"

Таблица 3. – Результаты измерений электронным тахеометром Trimble M3 DR TA 5''

Ориентировка алидады	Значение коллимационной ошибки c в приемах, ''						Среднее значение c , ''
	1 прием	2 прием	3 прием	4 прием	5 прием	6 прием	
0°	2,0	5,0	4,0	1,0	1,0	3,0	2,7
30°	3,0	5,0	2,0	6,0	5,0	7,0	4,7
60°	9,0	6,0	7,0	9,0	4,0	6,0	6,8
90°	7,0	11,0	13,0	9,0	12,0	9,0	10,2
120°	13,0	10,0	11,0	11,0	8,0	9,0	10,3
150°	8,0	11,0	6,0	8,0	9,0	7,0	8,2
180°	6,0	3,0	5,0	7,0	4,0	3,0	4,7
210°	5,0	9,0	8,0	6,0	10,0	8,0	7,7
240°	7,0	9,0	10,0	6,0	8,0	8,0	8
270°	4,0	8,0	9,0	5,0	4,0	5,0	5,8
300°	5,0	6,0	2,0	3,0	3,0	4,0	3,8
330°	6,0	4,0	1,0	2,0	5,0	3,0	3,5

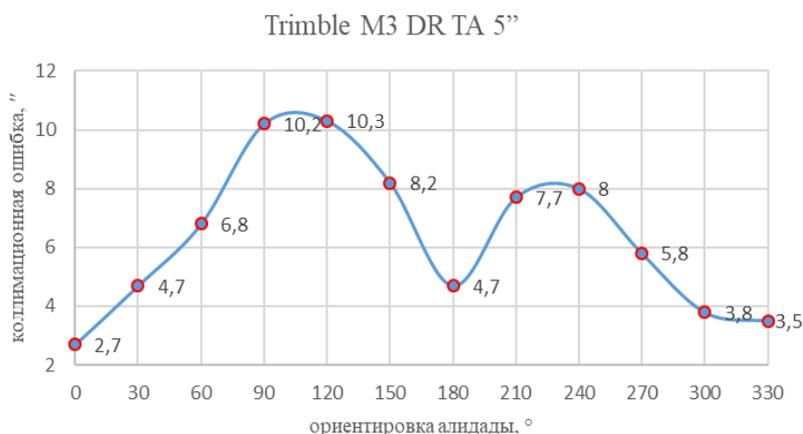


Рисунок 8. – Колебания коллимационной ошибки тахеометром Trimble M3 DR TA 5''

Таблица 4. – Результаты измерений электронным тахеометром Trimble M3 DR TA 2''

Ориентировка алидады	Значение коллимационной ошибки c в приемах, ''						Среднее значение c , ''
	1 прием	2 прием	3 прием	4 прием	5 прием	6 прием	
0°	3,0	1,0	1,0	2,0	3,0	1,0	1,8
30°	1,0	2,0	3,0	3,0	4,0	2,0	2,5
60°	4,0	5,0	7,0	4,0	6,0	5,0	5,2
90°	5,0	6,0	6,0	5,0	7,0	5,0	5,7
120°	6,0	4,0	4,0	5,0	4,0	3,0	4,3
150°	4,0	5,0	4,0	2,0	3,0	3,0	3,5
180°	3,0	1,0	3,0	2,0	3,0	4,0	2,7
210°	4,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	2,5
240°	2,0	3,0	1,0	4,0	1,0	2,0	2,2
270°	2,0	1,0	3,0	2,0	3,0	2,0	2,2
300°	2,0	3,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,0
330°	4,0	1,0	1,0	3,0	2,0	1,0	2,0

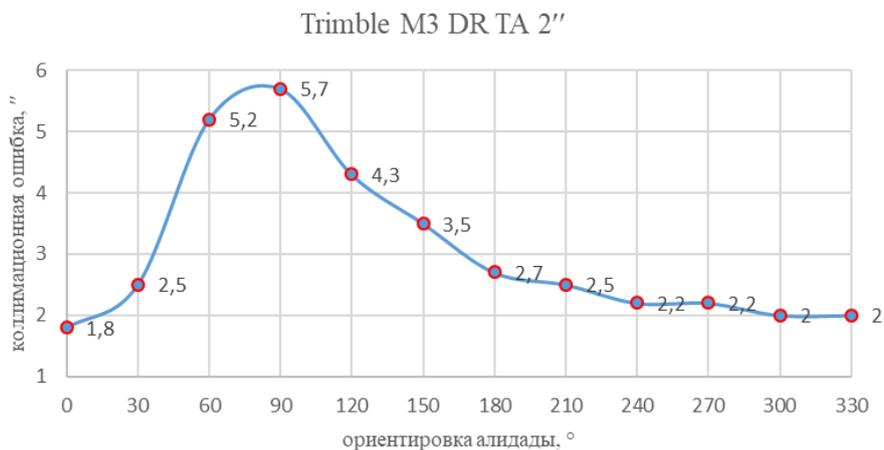


Рисунок 9. – Колебания коллимационной ошибки тахеометром Trimble M3 DR TA 2''

Таблица 5. – Результаты измерений электронным тахеометром Leica TCR 1201 1''

Ориентировка алидады	Значение коллимационной ошибки c в приемах, ''						Среднее значение c , ''
	1 прием	2 прием	3 прием	4 прием	5 прием	6 прием	
0°	3,2	2,6	3,9	2,4	1,9	2,8	2,8
30°	2,7	3,6	1,8	1,5	3,2	2,2	2,5
60°	2,7	3,9	4,2	2,2	1,8	2,4	2,9
90°	4,2	2,5	2,0	3,9	3,3	4,4	3,4
120°	1,3	2,8	1,0	0,9	2,5	1,2	1,6
150°	0,6	1,9	2,7	0,3	1,2	0,5	1,2
180°	1,5	2,3	0,6	1,0	-0,9	1,4	1,0
210°	-1,3	1,9	2,4	0,6	1,3	1,8	1,1
240°	1,5	0,9	1,1	3,1	0,8	1,6	1,5
270°	-0,4	2,2	1,7	2,9	1,1	1,6	1,5
300°	1,9	2,8	2,1	2,9	1,6	1,9	2,2
330°	1,8	2,7	2,9	2,7	2,3	3,1	2,6



Рисунок 10. – Колебания коллимационной ошибки тахеометром Leica TCR 1201 1''

На основании представленных в таблицах 2–5 коллимационных ошибок и их колебаний можно сделать выводы о влиянии эксцентриситета алидады на точность взятия отсчета по горизонтальному кругу представленными выше электронными тахеометрами с односторонней (Spectra Precision FOCUS 4 5'') и двусторонней (Trimble M3 DR TA 5'', Trimble M3 DR TA 2'', Leica TCR 1201 1'') системами отсчитывания по лимбу:

- можно утверждать, что тахеометр Leica TCR 1201 1'' из всех исследуемых электронных тахеометров имеет минимальное значение эксцентриситета алидады (максимальное колебание коллимационной ошибки на всех ориентировках алидады составляет 2,8'', что соответствует максимальному значению эксцентриситета алидады). Максимальное значение эксцентриситета практически в 3 раза превышает заявленную точность угловых измерений (точность измерения горизонтальных углов одним приемом – 1'', согласно руководству⁶). График колебания коллимационной ошибки достаточно сглажен и кроме ориентировок алидады 30°–120° не имеет резких перепадов, что говорит об отсутствии скачкообразного влияния эксцентриситета на отсчеты по горизонтальному кругу;

- колебание коллимационной ошибки у тахеометра Trimble M3 DR TA 2'' составляет 3,9'', что соответствует двойной точности измерения горизонтального угла данного тахеометра⁷. Согласно таблице 4 и рисунку 7 максимальное влияние эксцентриситета наблюдается на половине ориентировок алидады (диапазон 30°–180°);

- колебание коллимационной ошибки у тахеометра Trimble M3 DR TA 5'' составляет 7,6''. Данная величина в полтора раза превышает заявленную производителем точность измерения горизонтального угла одним приемом⁸. График коллимационной ошибки имеет значительные колебания на всех ориентировках алидады;

- тахеометр Spectra Precision FOCUS 4 5'' имеет максимальное значение эксцентриситета алидады среди исследуемых электронных тахеометров (максимальное колебание коллимационной ошибки составляет 10,6''). Данная величина соответствует двойной точности измерения горизонтального угла одним приемом⁹. График колебания коллимационной ошибки повторяет форму синусоиды, что характерно для приборов с односторонней системой отсчитывания.

Заключение. Результаты исследования эксцентриситета электронных тахеометров с односторонней и двусторонней системой отсчитывания показали следующее:

- 1) минимальное значение эксцентриситета наблюдается у самого точного (Leica TCR 1201 1'') из представленных выше электронных тахеометров;

⁶ См. сноску 3.

⁷ См. сноску 4.

⁸ См. сноску 4.

⁹ См. сноску 5.

2) максимальное значение эксцентриситета наблюдается у менее точного (Spectra Precision FOCUS 4 5") из представленных выше электронных тахеометров;

3) анализ величины эксцентриситета электронных тахеометров одной точности (Spectra Precision FOCUS 4 5" и Trimble M3 DR TA 5") показал, что тахеометр с двусторонней системой отсчитывания по лимбу обладает меньшим эксцентриситетом алидады. Данный факт соответствует общей теории эксцентриситета;

4) у всех приборов эксцентриситет превышает заявленную точность измерения угла в два и более раза (несмотря на то, что у электронных тахеометров с двусторонней системой отсчитывания влияние на отсчеты по горизонтальному кругу оказывает лишь остаточный эффект углового элемента эксцентриситета);

5) при работе тахеометрами с односторонней системой отсчитывания по лимбу обязательно измерение углов при двух кругах вертикального круга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Практикум по основным геодезическим работам / П.А. Болотов, С.В. Шубин, И.А. Рейман. – М.: Недра, 1977. – 336 с.
2. Геодезическое прибороведение / А.Л. Островский, Д.И. Маслич, В.Г. Гребенюк. – Львов: Вища школа, 1983. – 208 с.
3. Ямбаев Х.К. Геодезическое инструментоведение. – М.: Гаудеамус, 2011. – 583 с.

REFERENCES

1. Bolotov, P.A., Shubin, S.V. & Reiman, I.A. (1977). *Praktikum po osnovnym geodezicheskim rabotam*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
2. Ostrovskii, A.L., Maslich, D.I. & Grebenyuk, V.G. (1983). *Geodezicheskoe priborovedenie*. Lviv: Vishcha shkola. (In Russ.).
3. Yambaev, Kh.K. (2011). *Geodezicheskoe instrumentovedenie*. Moscow: Gaudeamus. (In Russ.).

Поступила 13.09.2023

INVESTIGATION OF THE ECCENTRICITY OF ALIDADE OF ELECTRONIC TOTAL STATIONS

K. MARKOVICH, I. SHEVELEV, A. IVASHNEVA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)
P. OSTROUSHKO
(*Road Construction Trust № 5, Minsk*)

The article presents the results of a study of the alidade eccentricity of modern electronic total stations. Accurate and high-precision electronic total stations were chosen as the subjects. The studied electronic total stations have a one-way and two-way limb counting system and are equipped with absolute type barcode limbs. The eccentricity of the alidade was determined from the fluctuation of the collimation error obtained for different orientations of the alidade. The research results showed that the maximum value of the alidade eccentricity in all the total stations studied is two or more times higher than the accuracy of angular measurements declared by the manufacturer.

Keywords: *electronic total station, eccentricity of alidade and limb, the center of the divisions of the limb, the axis of rotation of the alidade, one-way and two-way counting systems, collimation error.*