

УДК 528.381

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВТОРНОГО ВЫСОКОТОЧНОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ,
ВЫПОЛНЕННОГО КОМПЛЕКТАМИ ЦИФРОВЫХ НИВЕЛИРОВ TRIMBLE DINI 0.3
С РАЗНЫМИ ВЕРСИЯМИ ВСТРОЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ****Ю.А. ЧЕРКАС***(Представлено: канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ)*

В настоящее время, с развитием цифровых технологий все чаще при высокоточном геометрическом нивелировании применяют цифровые нивелиры. Внедрение в геодезическое производство нового высокоточного оборудования, ускоряющего процесс наблюдений и повышающего производительность труда, требует соответствующей организации контроля измерений. Основная задача контроля заключается в выявлении причин возникновения ошибок, заметно снижающих точность конечного результата. В работе сделана оценка точности повторного высокоточного нивелирования, выполненного комплектами цифрового нивелира Trimble Dini 0.3 на геодинамических полигонах Белоруссии. Сравниваются результаты, полученные аналогичными приборами, но с разными версиями программного обеспечения, и, следовательно, с разными методиками измерений на станции.

Изобретение электронных нивелиров в начале 90-х годов прошлого века способствовало вхождению нивелирования в новую эру. Его особенностью является автоматическое электронное считывание информации с кодированных реек, запись данных во внутреннюю память нивелира с дальнейшей передачей их для камеральной обработки на персональном компьютере.

В массовом производстве в достаточном количестве имеются электронные нивелиры, однако нет ни одного нормативного документа, определяющего порядок работы с этим типом инструментов. Традиционные методики, описанные в инструкциях, руководствах и т. п. создавались исходя из предпосылки превалярования действия случайных ошибок измерений, основным источником которых являлись процессы, связанные с личными ошибками исполнителей. Методика измерений, описанная в существующих инструкциях ориентирована на меры борьбы с ошибками, большинство из которых в цифровых приборах отсутствуют, однако на результаты начинают влиять систематические ошибки. В производстве получают невязки формально допустимые, но с превалярованием одного знака. Оптические нивелиры хотя и являются высокоточными механическими инструментами имеют довольно простое устройство, поэтому не составляет большого труда обнаружить конструкторские погрешности и устранить их, введя поправку за различие температуры реек при эталонировании на компараторе и при нивелировании, а также поправку за отличие средней длины метра комплекта реек от номинала.

Сегодня же производители до конца не раскрывают точность изготовления своей продукции главным образом из-за ее высокой цены. Нивелиры и рейки проверяются и калибруются на заводе изготовителе, там же вводятся поправки в программы измерений и все это держится в секрете в коммерческих целях. При этом у каждого производителя есть свой метод считывания информации с рейки, поэтому не имея специального оборудования нам пользователям не представляется возможным выявить и устранить существующие погрешности. [1].

Методика нивелирования I класса разработана таким образом, чтобы максимально уменьшить влияние случайных и систематических ошибок на измеренные превышения. Она изложена в инструкции по государственному нивелированию [2], в которой также даны основные допуски и требования к производству высокоточного нивелирования. Их надо неукоснительно соблюдать, т.к. для каждого требования существует теоретическая предпосылка.

Методика нивелирования I класса согласно инструкции по нивелированию требует, чтобы нивелирование I и II классов выполнялось в прямом и обратном направлениях, причем нивелирование I класса в каждом направлении прокладывается еще по двум парам костылей (левая и правая нивелировки). При нивелировании в прямом ходе на нечетной станции отсчеты начинаются с задней рейки, на четной – с передней. В обратном ходе, наоборот, на четной станции – с передней рейки, на нечетной – с задней. При этом, как в прямом ходе, так и обратном на каждой станции вначале берутся все отсчеты по левой паре костылей, затем – по правой.

Для сравнения результатов нивелирования будут взяты пять циклов наблюдений, выполненных на Полоцком геодинамическом полигоне (ГДП) с использованием комплекта цифрового нивелира Trimble Dini 0.3, имеющего старую версию встроенного программного обеспечения, и два цикла наблюдений, выполненных на ГДП Белорусской АЭС комплектом цифрового нивелира Trimble Dini 0.3, который имеет новую версию встроенного программного обеспечения, позволяющую работать по программе первого класса.

Методика высокоточного нивелирования при использовании цифрового электронного нивелира на Полоцком геодинимическом профиле отличалась от требований инструкции по нивелированию в следующем:

1) нивелирование выполняется только по одной паре костылей, так как работа электронных нивелиров в автоматическом режиме со старой версией программного обеспечения не предусматривает возможности нивелирования по двум парам костылей, но при двух горизонтах в каждом направлении (2 горизонта прямо, 2 горизонта обратно);

2) допуск на расхождение превышений на станции между двумя горизонтами был ужесточен до 0,3 мм (в I-ом классе допустимое расхождение превышения на станции 0,5 мм).

3) длина плеча допускалась не более 40 м (в I-ом классе не более 50 м).

Статистический анализ результатов нивелирования на Полоцком профиле был осуществлен для эпох 2006-2010 гг. по разностям превышений между первым и вторым горизонтам на станции для каждой секции. Результаты исследования представлены [3, 4].

Технология производства работ и допуски измерений при производстве измерений на ГДП Белорусской АЭС определялись требованиями инструкции [5].

Нивелирование I класса выполнено в прямом и обратном направлениях короткими лучами (до 30 м) при соблюдении равенства расстояний от нивелира до реек. В качестве переходных точек применялись штыри, костыли со сферической головкой с двумя разноуровневыми центрами, при прохождении по асфальтовому покрытию – массивные башмаки.

При нивелировании в прямом направлении (прямой ход) порядок наблюдений на станции:

- 1) отсчёт расстояния до задней рейки;
- 2) отсчёт по задней рейке нижнего центра;
- 3) отсчёт расстояния до передней рейки;
- 4) отсчёт по передней рейке нижнего центра;
- 5) отсчёт по передней рейке верхнего центра;
- 6) отсчёт по задней рейке верхнего центра;
- 7) отсчёт по передней рейке верхнего центра;
- 8) отсчёт по задней рейке верхнего центра;
- 9) отсчёт по задней рейке нижнего центра;
- 10) отсчёт по передней рейке нижнего центра.

Для контроля наблюдений на каждой станции подсчитывались превышения по верхнему и нижнему центрам. Разность превышений – не больше 0,15 мм. При нивелировании в обратном нивелировании порядок наблюдений соблюдается тот же, а нивелирные рейки менялись местами. Расхождение превышений прямого и обратного ходов по секции полученных как среднее из превышений по левой и правой линиям соответствующего направление, не превышали допуск 2 мм, где L – длина секции в км.

По левой линии нивелирования на нечетной и четной станциях отсчеты выполнялись в том же порядке, что и по правой. При нивелировании в обратном направлении наблюдения на нечетных станциях начинались с передней рейки, а на четных – с задней.

Высота луча визирования над подстилающей поверхностью допускалась не менее 0,5 м, согласно [5].

Согласно [5], выполнено четное число станций по каждой секции. На каждой станции подсчитывались значения превышений по наблюдениям при двух горизонтах нивелира. Не допускалось превышение этих расхождений более 0,15 мм. Если расхождение получалось больше допустимого, то измерения на станции повторялись, изменив при этом высоту инструмента не менее чем на 3 см.

При выполнении нивелирования контролировались полученные результаты по секциям. После выполнения прямого и обратного ходов подсчитывались расхождения средних превышений. Допуск не должен превышать, согласно техническому заданию, $2\sqrt{L}$ мм, где L – длина секции в км.

Принимая во внимания разную методику производства нивелирования на двух геодинимических полигонах, далее в статье произведён статистический анализ распределения разностей превышений между горизонтами для анализируемых эпох нивелирования на Полоцком профиле и анализ распределения разностей превышений между левой и правой нивелировками для эпохи нивелирования на геодинимическом полигоне Белорусской АЭС. Для каждого геодинимического полигона был составлен ряд разностей превышений за все эпохи. Исследуемые ряды исследовались на:

- 1) значимость систематического влияния;
- 2) наличие грубых погрешностей;
- 3) выявление неоднородности в исследуемом ряде;
- 4) выявление степени симметричности в исследуемом ряде.

При определении наличия значимых систематических погрешностей в ряде имеют место 2 случая: 1) известно истинное значение определяемой величины;

- 2) истинное значение величины не известно.

Пусть истинное значение измеряемой величины не известно. Тогда наличие в результатах наблюдений постоянной составляющей может быть выяснено по наиболее распространенному в геодезии критерию Аббе. Для этого выдвигаем гипотезу, что с вероятностью P в предложенном ряде отсутствует значимое систематическое влияние. По исследуемым величинам получаем практическую величину критерия (1):

$$\delta = \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{[d^2]}{[v^2]} \quad (1)$$

Являющуюся отношением двух оценок дисперсий, стандартные отклонения которых получены как (2):

$$\begin{cases} \sigma = \sqrt{\frac{[v^2]}{n-1}} \\ \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{[d^2]}{2(n-1)}} \end{cases} \quad (2)$$

В формулах (1-2) [...] – символ суммы Гаусса; $v_i = x_i - \bar{X}$ – отклонение i -той величины от среднего; $d_i = x_{i+1} - x_i$ – последовательные разности.

Для сравнения, по заданной вероятности P , числу степеней свободы n получают контрольную величину δ_{α} критерия Аббе. Тогда, при $\delta > \delta_{\alpha}$ принимается гипотеза об отсутствии систематической ошибки с вероятностью $P = 1 - \alpha$. (3)

$$\delta_{\alpha} = 1 + \frac{z_{\alpha}}{\sqrt{n + 0.5(1 + 2/n)}} \quad (3)$$

где z_{α} – квантиль уровня значимости $\alpha = 1 - P$ нормированного нормального распределения, n – число элементов в ряде [6].

На практике также часто используют критерий Смирнова-Граббса для выявления грубых погрешностей. Критерий дает вероятность выполнения выдвинутой гипотезы о том, что максимальное, или минимальное значение из ряда не являются грубыми погрешностями. Для этого по экстремальным значениям выборки X_{\max} и X_{\min} , среднему арифметическому \bar{X} и стандартному отклонению σ вычисляют предельные стандартизованные значения (4):

$$\begin{cases} T_{\max} = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{\sigma} \\ T_{\min} = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{\sigma} \end{cases} \quad (4)$$

Если $T_{\text{выч}} \leq G_n$, для максимального и минимального значения, то следует принять гипотезу об отсутствии в ряде грубых погрешностей, так как экстремальные значения не являются грубыми. Значения теоретической величины критерия G_n получают по заданному уровню значимости α и числу элементов в выборке n .

Значение G_n статистики критерия Смирнова-Граббса можно достаточно точно получить на основе формулы (5):

$$G_n = \frac{n-1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{t_{\alpha}^2(\frac{n-2}{n})}{t_{\alpha}^2(\frac{n-2}{n}) + n - 2}} \quad (5)$$

где $t_{\alpha}(\frac{n-2}{n})$ – квантиль t -распределения Стьюдента с уровнем значимости α и 2 степенями свободы и n элементами в ряде [7].

Для выявления степени неоднородности (неравноточности) результатов измерений используем самый простой параметрический F -критерий Фишера. Для этого разобьем исследуемую выборку на две примерно одинаковые подвыборки и для каждой вычислим стандартные отклонения σ_1 и σ_2 . Тогда, если вычисленное значение статистики Фишера $F_{\text{выч}} < F_{\text{кр}}$ (критического значения критерия), то принимается гипотеза с вероятностью P об отсутствии значимой неравноточности в ряде исследуемых величин. Здесь величина $F_{\text{кр}}$ вычисляется по формуле 6, причем в числителе, не зависимо не от чего, должна быть большая дисперсия. Значение $F_{\text{кр}}$ ($n_1, n_2, (1+P)/2$) вычисляют для распределения Фишера по n_1 (для числителя) и n_2 (для знаменателя) степеням свободы и вероятности $(1+P)/2$.

$$F_{\text{выч}} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad (6)$$

Для выявления степени симметричности результатов измерений используем следующие рассуждения. Если ряд полностью симметричен и случаен, то число положительных ошибок X_+ практически точно равно числу отрицательных X_- . Тогда степень отличия разности этих значений от нуля и будет

характеризовать степень случайности и симметричности ряда измерений. Практически задача решается на основе статистики Т и квантиля нормального распределения Гаусса z для уровня значимости $\alpha / 2$ (7):

$$|X_+ - X_-| < \sqrt{n} \cdot z_{(1-\frac{\alpha}{2})} \tag{7}$$

Таким образом, если неравенство (7) выполняется, то с вероятностью Р можно принять гипотезу о симметрии и случайности ряда исследуемых величин [8].

Результаты вычислений представлены в таблице.

Таблица. – Статистический анализ исследуемых рядов

Название параметра	Значение параметра для Полоцкого ГДП	Значение параметра для ГДП БелАЭС
Число разностей n	2752	3916
среднее \bar{X}	-0,032	-0,001
Сумма квадратов уклонения i- той величины от среднего [v ²]	32,296	26,084
Стандартное отклонение σ	0,108	0,082
Стандартное отклонение $\hat{\sigma}$	0,107	0,081
Критерий Аббе		
Сумма последовательных разностей [d]	62,499	51,498
Практическая величина критерия $\hat{\sigma}$	0,968	0,987
Квантиль уровня значимости ($\alpha = 1 - P$) $Z_{0.05}$	-1,645	-1,645
Контрольная величина критерия $\hat{\sigma}_\alpha$	0,969	0,974
Критерий Смирнова-Граббса		
Максимальное стандартизованное значение T_{max}	3,060	4,302
Минимальное стандартизованное значение T_{min}	3,308	3,906
Квантиль t-распределения Стюдента $t_{(n-2)}$	4,136	4,215
Значение статистики критерия Смирнова-Граббса G_n	4,123	4,205
F-критерий Фишера		
Стандартное отклонение σ_1	0,101	0,077
Стандартное отклонение σ_2	0,113	0,063
Вычисленное значение статистики Фишера $F_{выч}$	0,795	0,675
Критическое значение статистики Фишера $F_{кр}$	1,112	1,093
Степень симметричности		
Число положительных разностей X_+	1073	2002
Число отрицательных разностей X_-	1679	1914
квантиля нормального распределения Гаусса $z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$	1,96	1,96
$\sqrt{n} \cdot z_{(1-\frac{\alpha}{2})}$	103	123
$ X_+ - X_- $	606	88

Для визуализации полученных результатов при исследовании погрешностей на соответствие их нормальному закону распределения воспользуемся графическим методом с построением гистограммы. Для графического сравнения на соответствие эмпирического распределения теоретическому нормальному закону, построим на гистограмме его теоретический график (гауссиану), вычисляя значения функции плотности **f** в **граничных точках g_i** (рис. 1, 2).

Гистограмма позволяет наглядно представить тенденции изменения измеряемых параметров качества объекта и зрительно оценить закон их распределения. Кроме того, гистограмма дает возможность быстро определить центр, разброс и форму распределения случайной величины.

Визуальный контроль полученных гистограмм показывает, что явных отклонений эмпирического представления закона распределения и его теоретического аналога для ГДП БелАЭС не наблюдается (рис. 1). Это свидетельствует о схожести эмпирического и нормального закона распределения для данного геодезического полигона. Анализ гистограммы Полоцкого ГДП показал на присутствие отклонений эмпирического представления закона распределения и его теоретического аналога (рис. 2). Так же

наблюдается преобладание отрицательных разностей, что согласуется с ранее проведёнными исследованиями (3, 4).

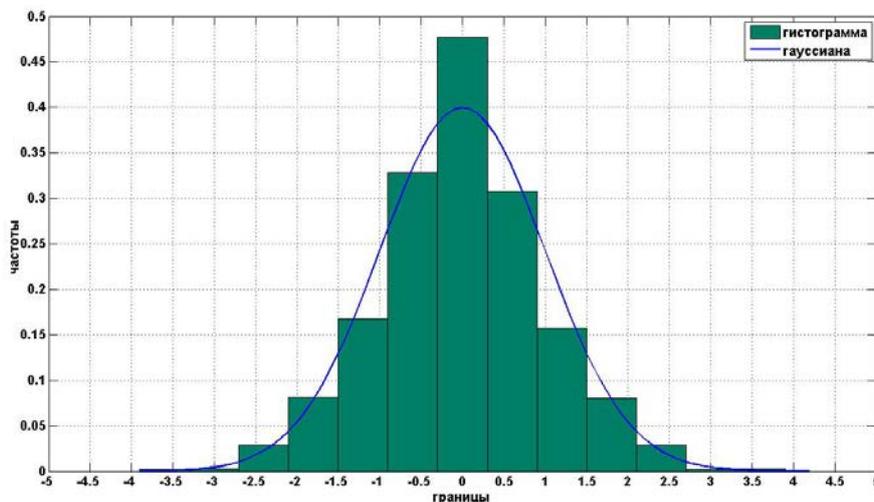


Рисунок 1. – Гистограмма распределения разностей превышений на станции на ГДП БелАЭС

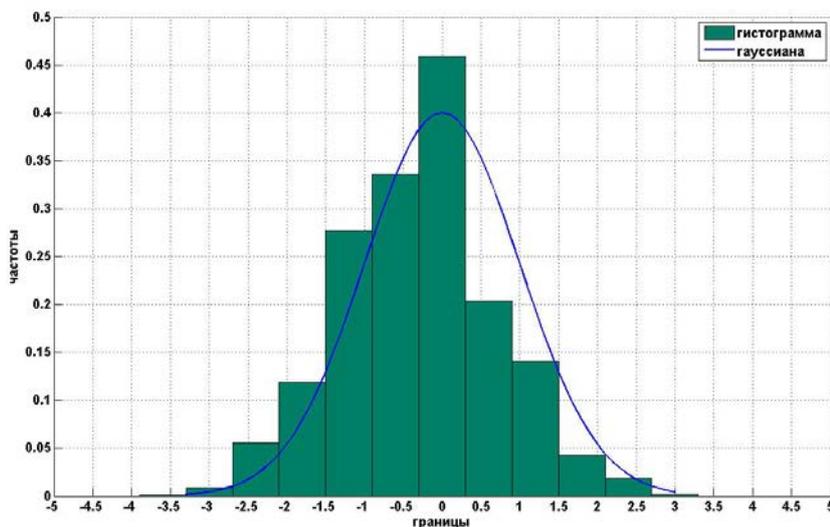


Рисунок 2. – Гистограмма распределения разностей превышений на станции на Полоцком ГДП.

Выводы. Полученные результаты статистического анализа высокоточного нивелирования электронным нивелиром Dini 0.3 на Полоцком геодинимическом полигоне, показали высокую точность результатов наблюдений. Однако разности превышений между первым и вторым горизонтами на станции указывают на присутствие в результатах измерений систематического искажения (согласно критерию Аббе и по степени симметричности). Соответственно принимаемая методика позволяет выполнять нивелирование с заданной точностью, однако она вносит в результаты наблюдений систематическое искажение.

Произведённый статистический анализ результатов нивелирования, выполненного по методике I класса на геодинимическом полигоне Белорусской АЭС, показал:

- 1) согласно критерию Аббе в исследуемом ряде отсутствует значимая систематическая составляющая;
- 2) максимальное значение ряда на 2,3% превысило допустимое значение согласно критерию Смирнова-Граббса, что говорит о присутствии в исследуемом ряде ошибок, близких к грубым;
- 3) в ряде отсутствует значимая неравноточность согласно F-критерию Фишера;
- 4) исследуемый ряд является симметричным.

Следовательно, принимая во внимание результаты анализа и построенные гистограммы можно сделать вывод об отсутствии в результатах нивелирования, выполненного комплектом цифрового нивелира по методике I класса, какого-либо систематического искажения. Таким образом, методика измере-

ний, примененная на геодинимическом полигоне Белорусской АЭС, является более оптимальной и позволяет выполнить измерения с меньшим значением систематической составляющей, что в конечном счете приводит к повышению точности полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Забогонский, С.А. Применение электронных нивелиров при высокоточных измерениях / С.А. Забогонский // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2011. – № 2. – С. 21–22.
2. Государственная нивелирная сеть Республики Беларусь. Порядок создания : ТКП 166 - 2008. – Минск, 2008. – 83 с.
3. Багрова, М.А. Анализ результатов высокоточного нивелирования, полученных электронным цифровым нивелиром / М.А. Багрова, Ю.А. Черкас // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Строительство. – 2013. – № 67. – С. 182–186.
4. Багрова, М.А. Анализ применения электронных нивелиров при исследовании деформаций земной коры / М.А. Багрова, Ю.А. Черкас // Труды молодых специалистов Полоцкого государственного университета. Строительство. – 2013. – № 67. – С. 186–187.
5. ГКИНП (ГНТА) Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. – М., ЦНИИГАиК, 2003.
6. Видуев, Н.Г. Теория математической обработки геодезических измерений / Н.Г. Видуев, А.Г. Григоренко. – Киев : Вища школа, 1978. – 356 с.
7. Большаков, В.Д. Практикум по теории математической обработке геодезических измерений / В.Д. Большаков, Ю.И. Маркузе. – М. : Недра, 1984. – 412 с.
8. Смирнов, Н.В. Теория вероятностей и математическая статистика в приложении к геодезии / Н.В. Смирнов, Д.А. Белугин. – М. : Недра, 1969. – 276 с.