

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ НИВЕЛИРОВ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ РАБОТ: ТЕОРИЯ, ПРАКТИКА, ПРОБЛЕМЫ



Ю.Е. ФЕДОСЕЕВ, к.т.н.,
ведущий научный сотрудник, МИИГАиК,
г. Москва

Современные геодезические приборы, известные в России как электронные нивелиры, стали повседневной обыденностью. Можно считать, что производство насыщено этими приборами, однако до сих пор у производителей нет однозначного отношения к их использованию. С одной стороны, проявляется явная эйфория: считается, что электронные нивелиры настолько хороши и совершенны, что нет необходимости использовать традиционные методики работы – все получится само собой. Кроме того, повторяется рекламное утверждение об увеличении производительности работ чуть ли не в два раза и возможности применения труда менее квалифицированных специалистов. С другой стороны, существует немало предприятий, на складах которых уже не один год хранятся приобретенные электронные нивелиры: исполнители боятся их применять, поскольку из-за отсутствия нормативной базы возникают сложности со сдачей результатов полевых работ. В других случаях специалистов-изыскателей не устраивают ограничения на длину визирного луча: действительно, при длине визирного луча более сорока метров точность измерения резко падает.

В данной статье, которая во многом носит обзорный характер, автор попытается рассмотреть проблемы, возникающие при работе с электронными нивелирами, и показать пути нормализации ситуации. Статья подготовлена на основании исследований и опытно-производственных работ, проводившихся в течение нескольких лет.

Создание высокоточных нивелирных сетей всегда рассматривалось как сложная профессиональная задача. В руководствах пользователя к большинству нивелиров указывается, что желаемая высокая точность может быть достигнута при выполнении работ проложением двойного хода, но при этом никак не поясняется, что под этим понимается. Высказанное утверждение привело к необходимости создания специальной методики выполнения работ, ее теоретического и экспериментального обоснования. Такая методика была разработана в МИИГАиК.

Постановка всякой изыскательской задачи требует конкретизации понятий, характеризующих точность выполнения работ, оценку численных значений нормативных параметров, определяющих эту точность, а также их фактические значения, получаемые при выполнении полевых работ. Только после этого можно говорить о каких-либо рекомендациях.

Начнем анализ с рассмотрения требований нормативных документов к проведению аналогичных работ традиционными методами. Цель анализа – получение численных значений параметров, определяющих технологию ведения работ.

ТРЕБОВАНИЯ ИНСТРУКЦИИ ГКИНП (ГНТА) – 03–010–03

Рассматриваемые сети могут быть проклассифицированы как классические, составляющие Главную высотную основу страны (ГВО), кроме того, они могут быть отнесены к сетям специального назначения [4]. Поэтому, считаем, что необходимо приблизиться к стандартной методике нивелирования I и II классов: стремиться к подобию получаемых результатов

как по точности, так и по объему измерительной информации, с тем чтобы иметь возможность анализировать процесс накопления влияния различных источников ошибок при работе на станции и при проложении ходов, создании полигонов.

В данном случае в качестве прототипа возьмем Инструкцию [1], в которой описано нивелирование I класса, используемое при создании Главной высотной основы (ГВО) страны. Предположим, что измерения ведутся по трассам, оборудованным в инженерном отношении, т.е. каждая речная точка закреплена костылем на все время, занимающее проложение хода «прямо» и «обратно». Основные технические параметры нивелирования разных классов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Класс нивелирования по ГКИНП (ГНТА) - 03 – 010 - 03	Средняя квадратическая ошибка		Допустимые невязки в полигонах и по линиям f , мм
	случайная η , мм/км	систематическая σ , мм/км	
I	0,8	0,08	$3\sqrt{L^*}$
II	2,0	0,20	$5\sqrt{L}$

Примечание: L – периметр полигона или длина линии, км. Ошибку вычисляют по невязкам линий или полигонов.

Обсуждаемые точностные требования отнесены к единице длины хода, выраженной в километрах. При разработке рекомендаций по технологии проведения работ целесообразно в качестве единичного превышения рассматривать превышение, измеренное на станции.

Под систематической ошибкой σ будем понимать такую ошибку, которая накапливается при суммировании, т.е. приводит к смещенным результатам, что в первую очередь приведет к невязкам, в которых будет превалировать один знак. Оговоримся, что превышения измеряются несколько раз, поэтому будем рассматривать единичное превышение, определенное по формуле:

$$h = z - п, \quad (1)$$

где z – отсчет по задней рейке; $п$ – отчет по передней рейке.

Обозначим μ – средняя квадратическая ошибка измерения на станции (случайная часть) превышения, оговоренного формулой (1); σ_h – систематическая ошибка того же превышения. Для расчета примем, что в километре хода укладывается 20 станций, т.е. средняя длина визирного луча равна 25 м, а $n = 20$. Ошибку $\mu_{ср}$ среднего превышения, измеряемого на станции нивелирования и принимаемого в дальнейшую обработку, можно определить как

$$\begin{aligned} \mu_{ср} &= \eta / \sqrt{n}, \\ \mu_{ср} &= 0,18 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (2)$$

Инструкцией (п.7.1.) оговаривается следующий объем единичных измерений на станции: «Нивелирование I класса производится в прямом и обратном направлении по двум парам костылей (кольев), образующих две отдельные линии: правую, соответствующую ходу по правым костылям, и левую – по левым костылям», при этом измерения производятся как по основной, так и по дополнительной шкале рейки (п.7.4). Так как в общем случае места постановки реек в ходе «прямо» и «обратно» могут не совпадать, необходимо считать, что измеряется четыре единичных превышения:

$$\mu = \mu_{ср} \sqrt{k}, \quad (3)$$

где k – усредненное число превышений вида (1); для нивелирования I класса принимается $k=8$, для нивелирования II класса $k=4$,

$$\sigma_h = \sigma / n. \quad (4)$$

В силу специфики действия систематических ошибок число повторных измерений не учитывается. Эти две характеристики определяют нормативное соотношение случайных и

систематических ошибок. По нашему мнению, целесообразно сравнить их для разных классов нивелирования и разных нормативных документов, данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Класс нивелирования	Численные значения параметров						Согласно требованиям документов	
	k	n	η, мм/км	σ, мм/км	на станции			σ _n
					μ _{ср}	μ		
I	8	20	0,8	0,08	0,18	0,51	0,004	ГКИНП (ГНТА) -03-010-03
II	4	20	2,0	0,2	0,45	0,90	0,010	
I	8	20	-	-	0,08	0,21	-	ГОСТ 24846
II	4	20	-	-	0,23	0,46	-	

Отметим, что соотношение случайных и систематических ошибок при оценке, отнесенной к 1 километру, равно 10:1. В то же время, в силу действия различных законов накопления и осреднения, соотношение случайных и систематических ошибок при работе на станции значительно меньше, чем 10:1. Полученные численные характеристики будем использовать при дальнейших расчетах, выполняемых для обоснования методики применения цифровых нивелиров при создании городской нивелирной сети I и II классов. Из опыта выполнения работ известно, что выдержать перечисленные требования при использовании оптических нивелиров на территории городов крайне сложно из-за специфики условий наблюдений: как правило, получаются более грубые результаты.

ТРЕБОВАНИЯ ГОСТа 24846

На территории городов выполняются высокоточные нивелирные работы при наблюдении за осадками отдельных сооружений и их комплексов. Работы ведутся с учетом требований ГОСТа 24846 [2]. Этим нормативным документом, учитывающим специфику высокоточных работ на территории городов, предусмотрены требования, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Условия геометрического нивелирования	Основные технические характеристики и допуски по ГОСТу 24846 для геометрического нивелирования классов				
	I	II	III	IV	
Применяемые нивелиры	Н-05 и равноточные ему		Н-3 и равноточные ему		
Применяемые рейки	РН-05 (односторонние штриховые с инварной полосой и двумя шкалами)		РН-3 (двусторонние шашечные)		
Число станций замкнутого хода, не более	2	3	5	8	
Визирный луч	Длина (не более), м	25	40	50	100
	Высота над препятствием (не менее), м	1,0	0,8	0,5	0,3
Неравенство плеч (расстояний от нивелира до реек) на станции, не более, м	0,2	0,4	1,0	3,0	
Накопление неравенств плеч в замкнутом ходе, не более, м	1,0	2,0	5,0	10,0	
Допускаемая невязка, в замкнутом ходе (n - число станций), мм	$\pm 0,15 \sqrt{n}$	$\pm 0,5 \sqrt{n}$	$\pm 1,5 \sqrt{n}$	$\pm 5 \sqrt{n}$	

Отметим, что сопоставимые параметры практически совпадают с оговоренными параметрами выполнения работ по Инструкции [1]. Вместе с тем, существуют и отличия. Нормативные значения, указанные в последней строке таблицы, необходимо рассматривать как предельные значения ошибок нивелирования на станции, следовательно, при переходе к средним квадратическим ошибкам, эти величины нужно разделить хотя бы на 2, таким образом:

$$\mu_{\text{ср}}=0,08 \text{ мм.}$$

Систематические ошибки никак не регламентируются, так как работы ведутся на небольших ограниченных территориях и их влияние предположительно не успеет сказаться. Существуют и отличия в методиках. Способ проведения работ следует принимать для нивелирования I класса – двойным горизонтом, способом совмещения, в прямом и обратном направлении или замкнутый ход. То есть, в данном случае $k=8$, откуда

$$\mu=0,21 \text{ мм.}$$

Требования к точности работы на станции по ГОСТу 24846 жестче, нежели сопоставимые требования Инструкции примерно в два-три раза (см. табл. 2).

Считаем необходимым обратить внимание на следующий факт. Результаты полевых измерений, не соответствующие совокупности рассмотренных требований, нельзя рассматривать как высокоточные. В шестидесятые годы прошлого столетия был придуман термин «нивелирование третьего класса повышенной точности», который вводился в производство специальным распорядительным документом Госстроя. Видимо, все, что хотя бы по одному параметру не соответствует нормативным требованиям, придется относить к этому классу работ.

Точностные характеристики, оговоренные в разделе, посвященном нормативным требованиям, могут быть достигнуты с применением цифровых нивелиров только при использовании некоторой методики измерений. В ГОСТе Р 8.563-96 [3], регламентирующем разработку методик измерений, понятие методики определено как совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с известной погрешностью. Точность измерений, необходимых для определения превышения в нивелирном ходе, оговорена данными табл. 1. Нужно априори рассмотреть допуски на выполнение отдельных операций, составляющих данную методику.

Понятие методики измерений предусматривает, что в случае необходимости нужно оговорить точность выполнения отдельных операций, для этого можно использовать следующую технологическую схему назначения допусков на точность отдельных операций. При рассмотрении проблемы априорной оценки точности, результата измерения, выполненного по некоторой методике, надо определить модель взаимодействия ошибок измерений различного рода. Применительно к высокоточному нивелированию используется следующая модель:

$$\mu_n^2 = \eta^2 n + \sigma^2 n^2, \quad (5)$$

где: μ_n – средняя квадратическая ошибка определения превышения, полученная в ходе выполнения n элементарных операций; η – совокупность случайных ошибок, возникших при выполнении каждой операции по определению некоторого элементарного превышения; σ – совокупность погрешностей измерений, носящих систематический характер, причем:

$$\eta^2 = \sum \eta_i^2, \quad (6)$$

$$\sigma = \sum \sigma_i \quad (7)$$

где i – номер операции.

Необходимо оговорить приемлемые численные значения η_i и σ_i . В ГОСТе Р 8.563-96 [3] рассматриваются погрешности измерений трех родов:

Методические – например, неадекватность модели, неадекватность алгоритма обработки и т.п. Очевидно, что используемая модель (5) не безгрешна и может быть подвержена вполне объективной критике, но она принята в качестве рабочей, и, следовательно, авторы берут на себя ответственность за последствия ее неадекватности.

Инструментальные – например, разрешающая способность, взаимодействие с объектом измерений, влияние внешних условий, задержки в передаче информации и т.п.

Субъективные – погрешности, обусловленные действиями оператора.

В данном случае в связи с применением автоматизированных средств измерений, на работу которых ошибки оператора не оказывают непосредственного влияния, априори субъективные ошибки признаются незначимыми. Все погрешности $\dot{\eta}_i$ и σ_i делятся на две категории: ничтожные погрешности, влиянием которых можно пренебречь; значимые погрешности, вносящие наиболее весомый вклад в суммарное значение погрешности.

В процессе разработки методики необходимо приложить все усилия для сведения влияния каждого источника к категории ничтожных погрешностей. Если это окажется невозможным или экономически нецелесообразным, то придется признать данный источник ошибок значимым. Число значимых источников ошибок должно быть ограничено. Влияние каждого источника не имеет права превосходить некоторого предела, в противном случае нужно искать иное техническое решение.

Под основными допусками понимают численные значения погрешностей, сравнение с которыми позволяет отнести данный источник погрешностей к той или иной категории или принять необходимые инженерные решения. Проведем оценку допустимых средних квадратических значений для различных категорий источников ошибок применительно к рассматриваемым технологиям высокоточного нивелирования:

$$\dot{\eta}_{\min} \leq \frac{\mu}{\Theta}; \quad (8)$$

$$\Delta_{\min} \leq 3 \dot{\eta}_{\min}, \quad (9)$$

где Θ – коэффициент обеспечения точности, как правило, из практических соображений принимается равным пяти, что соответствует предположению об одновременном существовании 25 источников погрешностей, оказывающих ничтожное влияние.

Численные значения обсуждаемых параметров сведем в табл. 4, аналогичную табл. 2.

Таблица 4

Класс нивелирования	Численные значения параметров							Согласно требованиям документов	
	$\mu_{\text{ср}}$	μ	$\sigma_{\text{н}}$	$\dot{\eta}_{\min}$	Δ_{\min}	σ_{\min}	$\dot{\eta}_{\max}$		σ_{\max}
I	0,18	0,51	0,004	0,10	0,30	0,01	0,17	0,010	ГКИНП (ГНТА) -03-010-03
II	0,45	0,90	0,010	0,18	0,54	0,03	0,30	0,017	
I	0,08	0,21		0,04	0,12		0,07	0,004	ГОСТ 24846
II	0,23	0,46		0,09	0,27		0,15	0,027	

Численное значение $\mu_{\text{ср}}$ для I класса оговорено нами равным 0,18 мм, следовательно:

$$\dot{\eta}_{\min} \leq 0,04 \text{ мм и } \Delta_{\min} \leq 0,12 \text{ мм.}$$

Систематическая погрешность, приемлемая при измерении признана равной $\sigma_{\text{н}} = 0,004$ мм, следовательно, при числе ничтожных источников систематических ошибок $\Theta = 4$ $\sigma_{\min} \leq 0,001$ мм. Допуски на значимые погрешности определяются по той же схеме, но оговаривается их возможное число Θ' . Если принять $\Theta' = 3$, то, согласно формуле (8):

$$\dot{\eta}_{\max} \leq \frac{\mu}{\sqrt{3}} \text{ или } \dot{\eta}_{\max} \leq 0,21 \text{ мм.} \quad (10)$$

Для признания систематической погрешности предельно допустимой необходимо

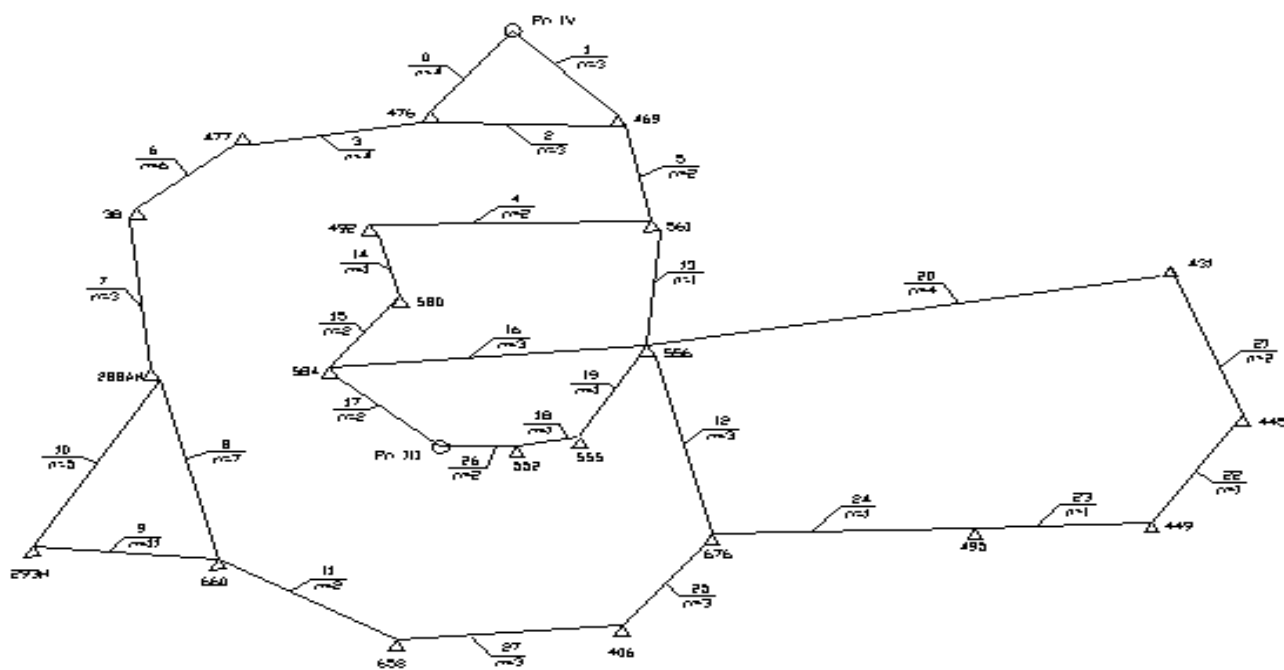
$$\sigma_{\max} \leq 0,1 \dot{\eta}_{\min}, \quad (11)$$

т.е. $\sigma_{\max} \leq 0,01$ мм. Это крайний случай, который может быть признан легитимным, если нет никакой возможности исправить положение.

Оговоренные допуски носят ориентировочный характер. Они могут быть использованы при разработке рандомизированной технологии измерений. С другой стороны, если результаты реальных измерений существенно превосходят оговоренные точностные параметры, то эти измерения придется отнести к упомянутому выше классу «нивелирование третьего класса повышенной точности», как бы привлекательно они не выглядели.

Представляет большой интерес нахождение реальных числовых значений точностных характеристик определения превышений с использованием цифровых нивелиров, пригодных по своим техническим данным к нивелированию I и II классов. Получение необходимых данных возможно только двумя путями: выполнение камеральных и полевых исследований нивелиров; проведение значительного объема экспериментально-производственных работ, результаты которых при соответствующей их обработке можно использовать как искомые числовые характеристики.

Исчерпывающее решение задачи разработки и отладки технологии выполнения высоко-точного нивелирования с применением электронных нивелиров может быть получено только по результатам соответствующих научно-исследовательских работ и последовавших за ними экспериментально-производственными работами. Однако эта проблема должна решаться методом последовательного приближения. По мере уточнения и конкретизации фактов возможно принятие более обоснованных решений по оптимизации технологии проведения работ.



Схемы нивелирной сети на территории Кремля:



В качестве первого приближения нами рассмотрены результаты опытно-экспериментальных работ по созданию каркасной нивелирной сети на территории Кремля при выполнении мониторинга процесса деформаций. На рисунке представлена схема нивелирных ходов I класса, построенная на территории Кремля для слежения за деформацией памятников в одном из циклов наблюдений. Условия местности диктовали использование коротких сторон длиной до нескольких метров. Повторение одних и тех же ходов в разных циклах наблюдений оказалось невозможным. Наблюдения выполнялись цифровым нивелиром производства фирмы *Leica* по нормативам Госстроя [2].

Результаты обработки первых двух циклов наблюдений показали, что полученные точностные параметры уравненной сети и найденные по маленьким полигонам невязки соответствовали требованиям нормативных документов. Тщательный анализ результатов уравнивания обнаружил, что все невязки малых полигонов (за небольшим исключением) имеют один знак, что говорит о наличии в измерениях систематических ошибок. Это подтверждают и вычисленные по большим полигонам значения невязок, которые в 2-3 раза превышают до-

пуск. Причем, систематические ошибки в первом и втором циклах измерений оказались равными +0,009 и -0,011 мм, что значительно превышает расчетные (см. табл. 4).

С результатами этих исследований можно ознакомиться более подробно [5]. На период отладки методики измерений, на наш взгляд, необходимо выполнять уравнивательные вычисления по специальной методике, предусматривающей учет влияния систематических ошибок. Нами использовались рекомендации К. Михайловича [6]. Описанный в этой работе алгоритм был модифицирован и реализован в среде Mathcad совместно со средствами пакета Excel. Уравнивание выполнялось параметрическим способом, учитывающим наличие в измерениях ошибок систематического характера, для контроля использовался коррелятивный способ. В связи с этим исполнителям было рекомендовано ежедневно дважды определять угол i , тщательно контролировать равенство плеч, не допускать их накопления по ходу и т.п., жестко соблюдая все нормативные требования по работе с оптическим нивелиром.

Анализ последующих работ показал, что систематические ошибки оказались значительно меньше, чем в первых двух циклах, но соотношения 10:1 достигнуто не было. Это означает, что применение цифровых нивелиров требует разработки иной методики измерений, нацеленной на борьбу не со случайными, а с систематическими ошибками. Этого сегодня пока нет. Кроме того, нужна тщательная подготовка исполнителей специально для этого вида работ.

Основным источником систематических ошибок при высокоточном нивелировании является неадекватный учет метрологических характеристик реек. В МИИГАиК создана технология калибровки штриховых реек совместно с нивелиром. Проведенные исследования показали, что наша технология ничем не хуже зарубежной, но многократно дешевле, да и возить инструменты нет необходимости. Кроме того, рейки желательнее подбирать в комплект по признаку подобия метрологических характеристик.

Вторым важным мероприятием, направленным на борьбу с систематическими ошибками, является изучение метрологических характеристик самого нивелира. Наши исследования ошибок недокомпенсации позволяют утверждать, что далеко не все экземпляры однотипных нивелиров можно использовать при выполнении высокоточных работ. В некоторых случаях приобретение дорогостоящих штриховых реек может оказаться неэффективным. В других случаях придется ужесточать требования к соблюдению равноплечия до пределов, выходящих за рамки разумного. Существует целый ряд специфических исследований и поверок, предназначенных именно для цифровых нивелиров. Необходимо разрабатывать регламент проведения метрологических исследований и регламент полевых поверок. Выполненные в МИИГАиК работы по метрологическому сопровождению высокоточного нивелирования с применением цифровых нивелиров собраны в работе «Поверка и калибровка цифровых нивелиров и штрихкодовых реек» [7].

Надо сказать, при выполнении исследований мы пришли к глубокому убеждению, что в настоящее время геометрическое нивелирование нужно комбинировать со спутниковым. Сегодня можно утверждать, что при использовании специальной технологии точность комбинированного спутникового и геометрического нивелирования может достигать 5-6 мм на 5 км, однако за это нужно бороться, и массовой технологии пока нет.

Литература

1. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов, ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. М., ЦНИИГАиК, 2004 г.
2. ГОСТ 24846-81. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений.
3. ГОСТ Р 8.563-96. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений.
4. Основные положения о Государственной геодезической сети. ГКИНП (ГНТА)-01-006-03 Утверждены приказом Федеральной службы геодезии и картографии России от 17 июня 2003 г., № 101-пр.

5. Зубарев А.Э., Лобазов В.Я., Федосеев Ю.Е. и др. Исследование особенностей накопления ошибок измерений при создании высокоточных сетей с использованием электронных нивелиров. Сборник по итогам научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 229-летию Московского государственного университета геодезии и картографии. М., МИИГАиК, 2008 г.
6. Михайлович К. Геодезия (уравнительные вычисления). Пер. С.В. Лебедева. Под ред. В.Д. Большакова. М., «Недра», 1984 г.
7. Гольгин Н.Х., Ковалев С.В., Лебедев С.В. и др. Поверка и калибровка цифровых нивелиров и штрихкодовых реек. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. М., МИИГАиК, 2009 г., № 2.