

А.Л.Островський, П.Г. Черняга¹

Національний університет “Львівська політехніка”

¹Рівненський державний технічний університет

РОЗРАХУНОК ОЧІКУВАНОЇ ТОЧНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМИ РОБІТ НА ГЕОДИНАМІЧНИХ ПОЛІГОНАХ

© Островський А.Л., Черняга П.Г., 2001.

На основании теоретических расчетов предложены методика и средства повышения точности нивелирования I класса с целью использования его для прецизионного нивелирования на геодинимических полигонах.

In the basis of theoretical calculation the method and means of the increase of firstclass levelling accuracy with the purpose of the using it for the precision levelling on the geodynamic poligon was proposed.

Найдосконалішим кількісним методом вивчення вертикальних рухів земної кори є високоточне геометричне нівелювання. Доказом важливості питань застосування геометричного нівелювання для вивчення геодинимічних процесів може бути велика кількість праць, в яких розглядається ця проблема.

Використовуючи відомі дослідження та нові досягнення в розвитку технічного забезпечення робіт для визначення вертикальних рухів, нами пропонується новий підхід вирішення питань висотного моніторингу, оснований на теоретичному розрахунку точності сучасних засобів і методів геометричного нівелювання та проектування програми вимірювань.

Випадкову граничну похибку умовного “погляду” на рейку (середню похибку відліків основної і допоміжної шкал) можна визначити за формулою[1]:

$$\begin{aligned} \mu_{noz}^2 = & \delta_{S_{сум}}^2 + \delta_{S_{нав}}^2 + \delta_{S_i}^2 + \delta_{від}^2 + \delta_{з.м.с}^2 + \\ & + \delta_{нах.рів}^2 + \delta_{под.р}^2 + \delta_{п'ят}^2 + \delta_{комп}^2 + \delta_{інш}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Випадкова похибка перевищення на станції нівелювання I класу, коли, як звичайно, ведеться праве та ліве нівелювання (або виконується нівелювання при двох горизонтах приладу), а також прокладаються прямий та зворотний ходи, буде:

$$\eta_h = \frac{\mu_{noz}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

При нівелюванні II класу прокладається одна лінія нівелювання, тому

$$\eta_h = \mu_{noz} \quad (3)$$

Систематичну граничну похибку перевищення на станції можна знайти за такою формулою:

$$\sigma_h^2 = \delta_{з.м.в}^2 + \delta_{реф}^2 + \delta_{темн}^2 + \delta_{комп}^2 + \delta_{н/к}^2 \quad (4)$$

Величина і знак систематичних похибок залежить від конкретних умов вимірювання, які не завжди є відомими і контрольованими. Тому, якщо розглядати сукупність вимірювань із вказаними похибками, то для врахування їх сумарного впливу при проектуванні програми спостережень необхідно цей вплив визначати як середнє квадратичне.

Беручи до уваги, що ми будемо проводити повторні спостереження, очікувані випадкові похибки різниці перевищень в сусідніх циклах знайдемо так.

Враховуючи формулу (1) і знаючи, що $\eta_{\Delta h} = \eta_h \cdot \sqrt{2}$, для I класу нівелювання одержимо:

$$\eta_{\Delta h} = \mu_{noz} . \quad (5)$$

Використовуючи формулу (3), для II класу нівелювання будемо мати:

$$\eta_{\Delta h} = \sqrt{2} \mu_{noz} . \quad (6)$$

Систематичні похибки різниці перевищень будемо знаходити за формулою:

$$\sigma_{\Delta h} = \frac{1}{2} \sigma_h . \quad (7)$$

Формула (7) отримана з припущенням, що стабільні систематичні похибки в різницях Δh будуть як мінімум зменшуватися вдвічі. Сталі систематичні похибки взагалі виключаються.

Формула очікуваної граничної середньої квадратичної похибки перевищення для ходу з n станцій буде мати вигляд:

$$\delta_h^2 = \eta_h^2 \cdot n + \sigma_h^2 \cdot n^2 , \quad (8)$$

а для різниці перевищень Δh -

$$\delta_{\Delta h}^2 = 2\eta_h^2 \cdot n + \frac{\sigma_h^2}{4} n^2 . \quad (9)$$

Формулу (9), враховуючи (5) і (7), можна записати в такому вигляді:

$$\delta_{\Delta h}^2 = \eta_{\Delta h}^2 \cdot n + \sigma_{\Delta h}^2 \cdot n^2 . \quad (10)$$

Формули (8) і (9) одержані, враховуючи таке: якщо маємо випадкову похибку η_h для одного перевищення, то для ходу із n станцій вона буде дорівнювати $\eta_h \cdot \sqrt{n}$, а для різниці перевищень $\eta_h \cdot \sqrt{2n}$.

Логічно, систематична похибка для ходу із n станцій буде дорівнювати $\sigma_h \cdot n$, але для різниці перевищень, враховуючи вищенаведені допущення про стабільність систематичних похибок в суміжних циклах спостережень, вплив цих похибок не занижимо, якщо приймемо їх за величину $\frac{\sigma_h \cdot n}{2}$.

Навпаки, в практиці вимірювань можна очікувати ще менший вплив систематичних похибок на різниці перевищень, ніж $\frac{\sigma_h \cdot n}{2}$.

Користуючись формулами (2 – 5), обчислимо граничні випадкові та систематичні похибки вимірювання перевищень на окремії станції геометричного нівелювання. Всі результати зведемо у табл.1.

Наведені в табл.1 значення похибок η_h для нівелювання I та II класів добре узгоджуються з такими ж похибками, які задані чинною інструкцією нівелювання [2]: $\eta_h = 0,253$ мм, $\sigma_h = 0,008$ мм (I клас) та $\eta_h = 0,630$ мм, $\sigma_h = 0,02$ мм (II клас).

Такі значення похибок легко отримати, якщо перейти від η_h на 1 км ходу заданих інструкцією [2] до таких же параметрів на станції, враховуючи, що середня кількість станцій на 1 км ходу дорівнює десяти.

Отже, маємо надійний контроль правильності теоретичних розрахунків.

Таблиця 1

Граничні похибки η_h та σ_h перевищень

№	Види та класи нівелювання	Граничні похибки перевищень		Допустимі нев'язки f_h (мм)
		η_h , мм	σ_h , мм	
1	Прецизійне нівелювання коротким променем ($S_{max}=25$ м)	0,063	0,006	$0,09 \cdot \sqrt{n}$
2	Прецизійне нівелювання ($S_{max}=50$ м)	0,107	0,008	$0,15 \cdot \sqrt{n}$
3	Нівелювання I класу коротким променем ($S_{max}=25$ м)	0,092	0,006	$0,13 \cdot \sqrt{n}$
4	Нівелювання I класу ($S_{max}=50$ м)	0,237	0,008	$0,3 \cdot \sqrt{n}$
5	Точне нівелювання II класу ($S_{max}=75$ м)	0,631	0,016	$0,9 \cdot \sqrt{n}$

Допустимі нев'язки в табл.1 дорівнюють η_h і збільшені в $\sqrt{2}$ разів, оскільки кількість станцій при вимірюваннях, які проектуються, незначне. Допустима нев'язка для першого класу нівелювання виявилась такою ж, як прийнята нев'язка в замкнених полігонах, що прокладаються для вимірювання осідань споруд нівелюванням I класу [1].

Користуючись формулами (2 – 5), обчислимо граничні випадкові та систематичні похибки визначення різниці перевищень Δh (або вертикальних зміщень – осідань чи піднімань) з однієї станції геометричного нівелювання. Результати обчислень зведено в табл.2.

Для підрахунку очікуваної похибки визначення перевищень h та різниці перевищень Δh для будь-якого ходу з кількістю станцій n будемо використовувати формули (8) і (10).

Точність визначення векторів Δh можна значно підвищити завдяки створенню мереж ходів, що опираються на нерухомі точки, та їх зрівноваженню. Ваги ходів

визначаються як величини, обернені до кількості станцій n_i , тобто $p_i = \frac{c}{n_i}$, де c – довільний коефіцієнт.

Граничні похибки визначення δ_h і $\delta_{\Delta h}$ з поодиноких висячих ходів завдовжки $L=1000$ м, 500 м, 300 м та 200 м наведені в табл.3.

Отже, ми провели теоретичні дослідження і практичні розрахунки, які представляють нову методику проектування точності геометричного нівелювання при виконанні висотного геодезичного моніторингу на ГДП. Використовуючи запропоновану методику, можна виконувати проектування програми спостережень за вертикальними рухами, частоти та тривалості циклів повторних вимірювань, встановлювати допустимі довжини ходів залежно від швидкостей вертикальних рухів.

Наведемо деякі розрахунки довжин ходів та використання видів та класів нівелювання при різних швидкостях вертикальних рухів.

Таблиця 2

Граничні похибки $\eta_{\Delta h}$ та $\sigma_{\Delta h}$ різниці перевищень

№	Види та класи нівелювання	Граничні похибки різниці перевищень Δh		Середня кількість станцій на 1км ходу
		$\eta_{\Delta h}$, мм	$\sigma_{\Delta h}$, мм	
1	Прецизійне нівелювання коротким променем ($S_{max}=25$ м)	0,089	0,003	n=20
2	Прецизійне нівелювання ($S_{max}=50$ м)	0,147	0,004	n=10
3	Нівелювання I класу коротким променем ($S_{max}=25$ м)	0,129	0,003	n=20
4	Нівелювання I класу ($S_{max}=50$ м)	0,338	0,004	n=10
5	Точне нівелювання II класу ($S_{max}=75$ м)	0,848	0,008	n=7

Таблиця 3

Граничні похибки δ_h і $\delta_{\Delta h}$

№	Види та класи нівелювання	$L=1000$ м		$L=500$ м		$L=300$ м		$L=200$ м	
		δ_h , мм	$\delta_{\Delta h}$, мм	δ_h , мм	$\delta_{\Delta h}$, мм	δ_h , мм	$\delta_{\Delta h}$, мм	δ_h , мм	$\delta_{\Delta h}$, мм
1	Прецизійне коротким променем ($S_{max}=25$ м)	n=20 0,31	n=20 0,40	n=10 0,21	n=10 0,28	n=6 0,16	n=6 0,22	n=4 0,13	n=4 0,18
2	Прецизійне ($S_{max}=50$ м)	n=10 0,35	n=10 0,47	n=5 0,24	n=5 0,32	n=3 0,18	n=3 0,25	n=2 0,15	n=2 0,21
3	I класу коротким променем ($S_{max}=25$ м)	n=20 0,42	n=10 0,58	n=10 0,30	n=10 0,41	n=6 0,22	n=6 0,32	n=4 0,18	n=4 0,26
4	I класу ($S_{max}=50$ м)	n=10 0,75	n=10 1,07	n=5 0,53	n=5 0,75	n=3 0,41	n=3 0,58	n=2 0,34	n=2 0,48
5	II класу ($S_{max}=75$ м)	n=7 1,67	n=7 2,24	n=5 1,41	n=5 1,90	n=3 1,10	n=3 1,47	n=2 0,89	n=2 1,20

Таблиця 4

Значення ймовірностей визначення вертикальних рухів залежно від частоти повторних вимірів і довжин ходів

Параметри		Числові значення параметрів																
		1000				500				300				200				
Довжини ходів, м		0,3	0,6	0,9	1,0	0,3	0,6	0,9	1,0	0,3	0,6	0,9	1,0	0,3	0,6	0,9	1,0	
Проміжки часу Δt в роках		0,3	0,6	0,9	1,0	0,3	0,6	0,9	1,0	0,3	0,6	0,9	1,0	0,3	0,6	0,9	1,0	
Швидкості v_e , мм/ Δt		0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0	
Нівелювання	прециз.к оротк. пром.	Граничні похибки різниць перевищень	0,40				0,28				0,22				0,18			
		Ймовірності визначення v_e	-	0,6	0,73	0,8	-	0,72	0,81	0,86	0,56	0,78	0,85	0,89	0,64	0,82	0,88	0,91
		Доцільні частоти	-	-	1	1	-	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1
	преци- зійне	Граничні похибки різниць перевищень	0,47				0,32				0,25				0,21			
		Ймовірності визначення v_e	-	0,53	0,69	0,76	-	0,68	0,79	0,84	-	0,75	0,83	0,88	0,58	0,79	0,86	0,90
		Доцільні частоти	-	-	1	1	-	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1
	I кл. коротким променем	Граничні похибки різниць перевищень	0,58				0,41				0,32				0,26			
		Ймовірності визначення v_e	-	-	0,61	0,71	-	0,59	0,73	0,80	-	0,68	0,79	0,84	-	0,74	0,83	0,87
		Доцільні частоти	-	-	1	1	-	1	1	1	-	1	1	1	-	1	1	1
	I кл.	Граничні похибки різниць перевищень	1,07				0,75				0,58				0,48			
		Ймовірності визначення v_e	-	-	-	-	-	-	-	0,62	-	-	0,61	0,71	-	0,5	0,68	0,76
		Доцільні частоти	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-	1	1
	II кл.	Граничні похибки різниць перевищень	2,24				1,90				1,47				1,20			
		Ймовірності визначення v_e	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Доцільні частоти	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Можна показати, що при $v=0,5\text{мм/рік}$ вертикальні рухи визначаються з ймовірністю $p\approx 0,70$ (якщо цикли рознесені в часі на рік) тільки ходами прецизійного нівелювання коротким променем завдовжки до 30м. При цьому рекомендується наводити кутовий бісектор труби не на середнє положення штриха, що коливається, а на верхнє положення, на верхні піки коливання цього штриха, якщо труба має пряме зображення.

При швидкості вертикального руху $v=1,0\text{мм/рік}$ за таких же умов можна визначати такі рухи з ймовірністю $p\approx 0,70$ прецизійним коротким та прецизійним нівелюванням ходами до 500м, а нівелюванням I класу – до 300м.

Якщо на активних ділянках земної поверхні, де є зсуви, швидкість вертикальних рухів доходить, наприклад, до 10мм/місяць, то з ймовірністю $p\approx 0,80$ можна визначати такі рухи нівелюванням II класу при довжинах ходів до 1км.

В табл. 4 наведені значення ймовірностей визначення швидкостей вертикальних рухів і оптимальних частот. Досить наочно показано, що при рівномірних рухах, які становлять 2мм за рік, та від довжин висячого нівелірного ходу можна визначити оптимальні частоти спостережень.

Як видно з табл.4, нівелювання II класу непридатне при всіх значеннях довжин ходів; нівелювання I класу ($S_{\text{max}}=50\text{м}$) можна використовувати тільки для рухів $v=2,0\text{мм/рік}$ при довжинах ходів 500 – 200м.

Для виявлення руху при інтервалах менше року (0,3; 0,6; 0,9) необхідно виконувати прецизійне нівелювання коротким променем з довжиною ходу до 200м.

Результати табл. 4 ще раз підкреслюють важливість наших досліджень.

Висновки

1. На основі теоретичних розрахунків встановлено, що застосування найсучасніших методів та засобів нівелювання мають поки що не використані можливості підвищення точності геометричного нівелювання.

Так, перехід від нівелювання I класу з допустимою довжиною плеч в 50м до нівелювання I класу короткими плечами (не більше ніж 25м) дає можливість отримати на станції $\eta_h=0,092\text{мм}$ і $\sigma_h=0,006\text{мм}$, тобто зменшити випадкову похибку в 2,6 раза.

2. Виконані розрахунки точності проведення робіт найсучаснішими нівелірами та суперінварними і кодовими рейками. Таке нівелювання назване прецизійним і може вестися плечами до 50м, як і нівелювання I класу. Воно характеризується на окремій станції такими параметрами $\eta_h=0,107\text{мм}$ і $\sigma_h=0,008\text{мм}$.

Порівнюючи прецизійне нівелювання з нівелюванням I класу, бачимо, що випадкові похибки такого нівелювання зменшились в 2,2 раза. Похибки прецизійного нівелювання на 1км ходу становлять 0,338мм, замість 0,749мм при нівелюванні I класу.

3. Можливість підвищити точність нівелювання найсучаснішими методами та засобами правомірна, якщо перейти від допустимих плеч в 50м до нівелювання короткими плечима (не більше ніж 25м). Таке нівелювання назване прецизійним нівелюванням коротким променем.

Прецизійне нівелювання коротким променем характеризується параметрами $\eta_h=0,063\text{мм}$ і $\sigma_h=0,006\text{мм}$. Воно точніше від нівелювання I класу майже в чотири рази. Дійсно, на 1км ходу (з врахуванням η_h і σ_h) отримаємо $m_{II/K}=0,208\text{мм}$, $m_{I_{кл}}=0.804\text{мм}$

($m_{II/K}$ – середньоквадратична похибка прецизійного нівелювання коротким променем і $m_{I_{кл}}$ – I класу нівелювання).

Все це відкриває нові можливості визначення вертикальних геодинамічних рухів на основі повторних вимірювань і дає змогу не тільки підвищити точність визначення параметрів вертикальних рухів, але й скорочує час, необхідний для визначення цих параметрів.

1. Ганьшин В.Н. и др. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов. – М.: Недра, 1991. – 192 с. 2. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. – М.: Недра, 1990. – 175 с.