

УДК 528.1 (075.8)

К. О. БУРАК¹, М. Я. ГРИНІШАК²¹Кафедра інженерної геодезії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Карпатська вул., 15, Івано-Франківськ, 76000, тел. (067) 34-25-436, ел. пошта Burak.cost@YANdex.ua²Кафедра інженерної геодезії, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Карпатська вул., 15, Івано-Франківськ, 76000, тел. (098) 80-94-099, ел. пошта nikolaygrynishak@bigmir.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ЗЧИТУВАННЯ ВІДЛІКУ ПІД ЧАС ГЕОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ КОРОТКИМ ПРОМЕНЕМ ЦИФРОВИМИ НІВЕЛІРАМИ

Одним з сучасних методів спостереження за осіданнями унікальних споруд (фундаментів АЕС, висотних гребель ГЕС, прискорювачів заряджених частинок, радіотелескопів) є високоточне геометричне нівелювання коротким променем цифровим нівеліром. Основою для розробки методики нівелювання є СКП (середня квадратична похибка) відліку. Під час роботи з цифровим нівеліром, на відміну від оптичного, є можливість без суттєвого збільшення трудомісткості вимірювань (практично і часу) визначати відлік на рейку як середнє арифметичне з n -зчитувань рейки. Виконано дослідження залежності величини $m_{відл}$ (середньої квадратичної величини з n зчитувань) від довжини візирного променя D (в діапазоні від 5 до 30 м), кількості зчитувань відліків n та освітленості рейки E з метою як встановлення математичної залежності для підрахунку $m_{відл}$, так і визначення оптимальної величини n . Дослідження полягало у вимірюванні електронним нівеліром еталонних перевишень, які відомі з точністю, що на порядок вища від тієї, яку забезпечує цифровий нівелір. Еталонні перевищення задавалися попередньо перевіреним підйомним механізмом, що використовувався для зміни висоти рейки відносно візирного променя нівеліра і забезпечував точність встановлення зміни висоти рейки $m = \pm 0,003$ мм. Похибки за нахил рейки у результатах немає. За результатами експериментальних вимірювань встановлено, що освітленість у діапазоні від 80 до 360 лк (люксів) не впливає на точність автоматичного зчитування відліків. Водночас існує чітка лінійна залежність $m_{відл}$ від D та n , яка для високоточного нівеліра TOPCON DL-501 апроксимується рівнянням $m_{відл}(мм) = 0,0014D(м) - 0,001n + 0,002$, а для точного електронного нівеліра Sprinter 150M - рівнянням $m_{відл}(мм) = 0,004D(м) - 0,007n + 0,042$. Аналіз показує, що $m_{відл}$ для точного нівеліра, на відміну від високоточного, більшою мірою залежить від кількості зчитувань рейки. Одержані залежності дають змогу розробляти оптимальні методики виконання геометричного нівелювання та їх можна використати під час розроблення нормативних документів.

Ключові слова: геометричне нівелювання цифровим нівеліром; СКП зчитування відліку; довжина променя нівелювання; кількість зчитувань рейки; освітленість рейки.

Вступ

Електронні геодезичні прилади набули широкого застосування в практиці виконання геодезичних робіт, оскільки, порівняно з оптичними, володіють низкою істотних переваг (вища продуктивність праці, зручність використання, відсутність похибок спостерігача під час взяття відліку, відсутність необхідності напружувати зір під час приведення приладу в робоче положення та зчитування відліків з рейки). Проте на сьогодні немає нормативних документів, які б чітко визначали методики виконання геодезичних робіт (зокрема нівелювання) електронними приладами. Так, у роботі [Гайрабеков, 2010] автори зазначають, що “з впро-

вадженням в останні роки електронних нівелірів виникли труднощі, пов’язані з невідповідністю традиційних методик виконання відповідних робіт та технічних можливостей і особливостей сучасних приладів”.

Мета

Встановити математичну залежність для підрахунку похибки зчитування відліку для цифрових нівелірів, що є основним для розробки методики нівелювання.

Аналіз основних джерел та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

У роботі [Гайрабеков, 2010] автори запропонували теоретичні положення методу гео-

метричного нівелювання, враховуючи особливості електронних нівелірів з Rab-кодovими рейками, суть якого полягає у прокладанні нівелірного ходу двома лініями при одному горизонті приладу, контролюючи зміну кута i на суміжних станціях. У [Тревого, 2012] описано методику цифрового нівелювання з однією рейкою без зміни горизонту приладу. Результати дослідження точності цифрового нівелювання з урахуванням додаткових переміщень рейок наведено в роботі [Тревого, 2011]. Також виконано низку досліджень впливу температури та вібрації на результати роботи цифрових нівелірів [Бурак, 2012], [Бурак, 2011], [Helmut WOSCHITZ, 2003].

Виклад основного матеріалу

Сучасна методика цифрового нівелювання зводиться до того, що ми беремо n_1 відліків на задню рейку ($Z_1; Z_2; \dots; Z_i$) та n_2 відліків на передню рейку ($\Pi_1; \Pi_2; \dots; \Pi_j$) та знаходимо перевищення на станції за формулою:

$$h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} Z_i}{n_1} - \frac{\sum_{j=1}^{n_2} \Pi_j}{n_2}. \quad (1)$$

Припустивши, що $n_1 = n_2 = n$, отримуємо n вимірних перевищень на станції. Використовуючи (1), прийнято вважати, що h_{cp} ми одержуємо з певною точністю, яка зростає пропорційно n . Проте це припущення справедливе під час виконання таких умов:

- ваги вимірювань вибрані правильно (у нашому випадку вимірювання рівноточні – ваги однакові);
- похибки вимірювань некорельовані;
- відсутні систематичні похибки вимірювань.

Зупинимось на впливі кореляційної залежності між похибками вимірювань. Так, у [Ельясберг, 1983] зазначено, що за умов існування додатної кореляційної залежності між похибками різних вимірювань з постійним коефіцієнтом кореляції $K(\xi_i; \xi_j) = k$ (де ξ_i, ξ_j – величини кореляційних залежностей між похибками вимірювань, $i \neq j$) для обчислення стандартного відхилення $\sigma(h_{cp})$ похибки визначення h_{cp} з (1) доцільно скористатись формулою:

$$\sigma(h_{cp}) = \sigma \sqrt{\frac{1-k}{n} + k}, \quad (2)$$

де σ – СКП визначення h_{cp} , якщо $n = 1$.

Аналізуючи (2) бачимо, що при $k = 1$ (випадок лінійної залежності похибок вимірювань) достатньо одного вимірювання для досягнення максимальної точності σ_{max} . У реальних випадках, коли $0 < k < 1$, точність визначення h_{cp} з (1) асимптотично наближається до величини $\sigma\sqrt{k}$. Причому, починаючи з деякої величини $n_{кр}$, зменшення похибки стає несуттєвим і виконання додаткових вимірювань недоцільне. Що більший коефіцієнт кореляції k , то менше значення $n_{кр}$. Отже, для обґрунтування максимальної точності одержання перевищення (σ_{max}) та достатньої для цього кількості вимірювань ($n_{кр}$) необхідно точно знати ξ_i, ξ_j , які на практиці виявити надзвичайно важко і навіть неможливо [Ельясберг, 1983].

Нами виконане дослідження зміни величини похибки зчитування відліку ($m_{від}$) для точних цифрових нівелірів (DiNi 22, DNA 10, SDL50, Sprinter 150, Sprinter 150M, Sprinter 250 M), які за паспортними даними забезпечують СКП на кілометр подвійного ходу 1–2 мм і високо-точних нівелірів (Leica DNA03, Trimble Dini 12, Leica DNA03), які за паспортними даними забезпечують СКП на кілометр подвійного ходу 0,3–0,4 мм.

Дослідження полягало у вимірюванні електронним нівеліром еталонних перевищень, які задавалися з точністю, що на порядок вища від точності, яка досягається цифровим нівеліром. Еталонне перевищення задавалося підйомним механізмом (рис. 1), що використовувався для зміни висоти рейки відносно візирного променя нівеліра. Підйомний механізм обладнаний відліковим барабаном 2, ціна поділки якого 0,1 мм. Рейка встановлювалась на пластину 1 підйомного механізму.

Попередньо ми виконали дослідження точності самого підйомного механізму за допомогою індикатора годинникового типу 5 (на рис. 1 подано систему підйомний механізм-індикатор годинникового типу), який нерухомо кріпився закріпним гвинтом 6 спеціального штатива над столиком підйомного механізму 1. Ціна поділки індикатора годинникового типу згідно з паспортними даними та за результатами метрологічної атестації дорівнює $0,01 \pm 0,003$ мм.

З метою підвищення точності дослідження виконано у закритому прохолодному приміщенні

із стабільною температурою двома різними метрологічно повіреними індикаторами годинникового типу незалежно один від одного. Різні особи виконали декілька прийомів спостережень.

Методика досліджень підйомного механізму полягала в такому: привівши систему підйомний механізм – індикатор годинникового типу в

початкове положення (щуп 11 індикатора 5 торкається столика 1 підйомного механізму, а відлік на індикаторі близький до 0), здійснювалося піднімання столика 1 підйомного механізму за допомогою підйомного гвинта 3 з кроком 0,1 мм та на кожній установці фіксувалися відліки на індикаторі 5.

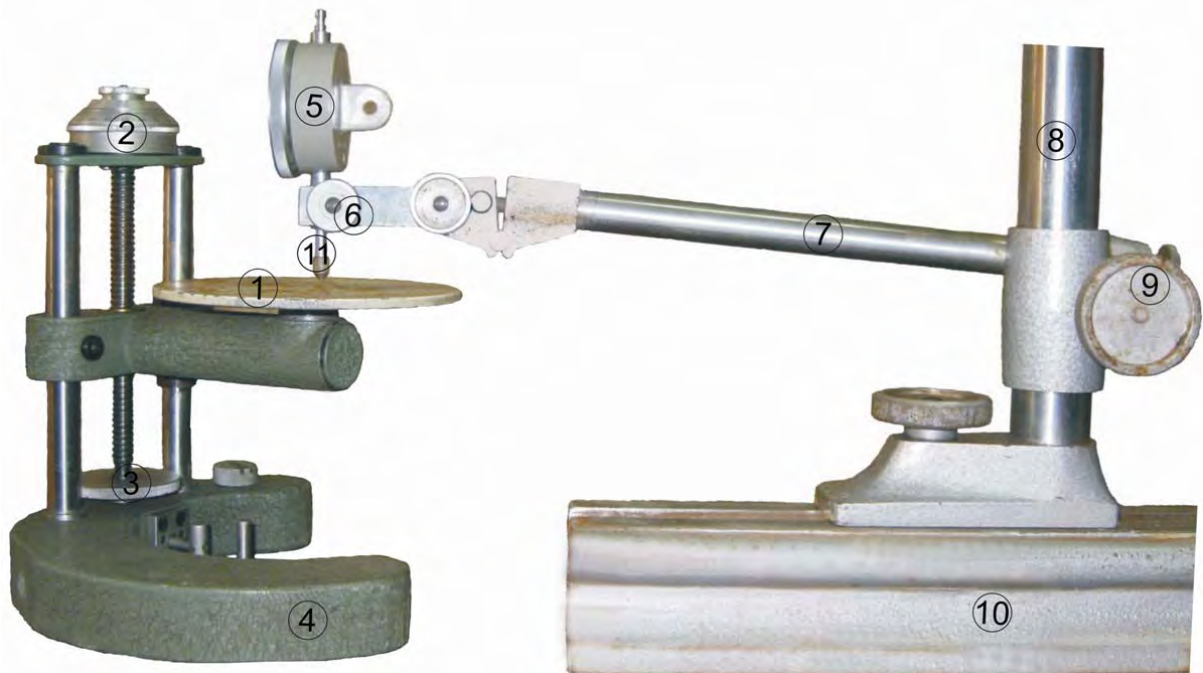


Рис. 1. Дослідження точності роботи підйомного механізму:

- 1 – встановлююча пластина; 2 – відліковий барабан; 3 – підйомний гвинт; 4 – опорна стійка;
5 – індикатор годинникового типу; 6 – закріпний гвинт індикатора; 7 – горизонтальна стійка;
8 – вертикальна стійка; 9 – закріпний гвинт горизонтальної стійки; 10 – опорна стійка; 11 – щуп індикатора

Fig. 1. Research of the lifting mechanism's accuracy:

- 1 – setting plate; 2 – counting cylinder; 3 – lifting screw; 4 – supporting stand;
5 – indicator of the watch type; 6 – fixing screw of the indicator; 7 – horizontal stand; 8 – vertical stand;
9 – fixing screw of the horizontal stand; 10 – supporting stand; 11 – probe of the indicator

дослідження проводились у прямому та зворотному напрямках роботи підйомного механізму (на піднімання та на опускання) на всьому діапазоні роботи підйомного гвинта 3. Під час дослідження точності зчитування відліку електронними нівелірами роботи виконувались тільки на вкручування підйомного гвинта 3.

Для обчислення СКП визначення перевищення підйомним механізмом використано формулу Гаусса [Зазуляк, 2007] (результати обчислень наведено в табл. 1).

За істинні приймалися дійсні значення перевищень, обчислені як різниці відліків індикатора 5 на послідовних установках підйомного

механізму – стовпець 4 табл. 1. Істинною похибкою є різниця між перевищеннями, виміряними підйомним механізмом, та цими самими перевищеннями, виміряними індикатором годинникового типу – стовпець 5 табл. 1.

За результатами досліджень встановлено, що СКП визначення перевищення підйомним механізмом $m = \pm 0,0034$ мм, надійність обчислення якої $m_m = \pm 0,0002$ мм (табл. 1). Цифрові нівеліри навіть у точному режимі вимірювань видають на табло відлік з точністю 0,01 мм, тож робимо висновок, що точність роботи підйомного механізму достатня для виконання досліджень нівелірів.

Таблиця 1

Обчислення СКП вимірювання перевищення підйомним механізмом
Calculation of MSE measuring of the exceeding by the lifting mechanism

№ з/п	Відлік за підйомним механізмом, мм	Відлік за індикатором годинникового типу x_i , мм	Перевищення, виміряне індикатором $x_i - x_{i-1}$, мм	v , мм	v^2 , $\text{мм}^2 \times 10^{-6}$
1	2	3	4	5	6
1	0,1	0,098			
2	0,2	0,196	0,098	-0,002	4
3	0,3	0,298	0,102	0,002	4
4	0,4	0,400	0,102	0,002	4
...
n-1	5,9	5,908			
n	6,0	6,006	0,098	-0,002	4
					$\sum v^2 = 0,00138 \text{ мм}^2$
$m = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} = \pm 0,0034 \text{ мм};$			$m_m = \pm \frac{m}{\sqrt{2n}} = \pm 0,0002 \text{ мм}$		

Ще однією проблемою під час дослідження точності відліку електронним нівеліром було забезпечення стійкості перебування рейки у чітко вертикальному положенні. Для цього ми використали пристрій, зображений на рис. 2: штрихкодowa рейка 2 встановлювалась на столик підйомного механізму 1 у чітко вертикальне положення за допомогою круглого рівня. Непорушність рейки забезпечувалась за допомогою штатива 3 з фіксатором 4 (виготовленим з спеціального матеріалу), який давав змогу переміщуватись рейці тільки у вертикальному напрямку.

Методика визначення $m_{відл}$ електронним нівеліром полягала в такому:

1. На заданих довжинах променя ($4,94 \text{ м} \leq D \leq 29,51 \text{ м}$ для точних нівелірів та $5,01 \text{ м} \leq D \leq 49,97$ для високоточних нівелірів) за відомої величини освітленості в діапазоні $80 \text{ лк} < E < 360 \text{ лк}$ бралися відліки на вертикальну нерухомо закріплену рейку.

2. Виконували піднімання рейки вкручуванням гвинта 3 підйомного механізму (рис. 1) на величину до 5 мм з кроком $\Delta h_{\text{теор}}$ (1,0 мм між і та і+1 установками підйомного механізму).

3. На кожній установці (через 1,0 мм) брали по 10 відліків. Результати наведені в стовбцях 1–3 табл. 2 (у зв'язку з обмеженими розмірами статті таблиця містить результати для $D = 5,01 \text{ м}$ та $D = 9,96 \text{ м}$).



Рис. 2. Рейка на підйомному механізмі:
 1 – підйомний механізм; 2 – штрихкодowa рейка;
 3 – штатив; 4 – фіксатор штрихкодowoї рейки

Fig. 2. Leveling rod on the lifting mechanism:
 1 – the lifting mechanism; 2 – barcode leveling rod;
 3 – tripod; 4 – retainer of the barcode leveling rod

4. Імпортувавши результати вимірювань з пам'яті цифрового нівеліра в РС, обчислювали СКП вимірювання перевищення та $m_{відл}$ за умови одно-, двох-, трьох-, п'яти-, восьми- та десятиразового зчитування відліків на рейку (в табл. 2 наведено результати взяття відліків та

обчислень m_{eidl} для одно- та десятиразового зчитування відліків). Щоб встановити, чи існує залежність між m_{eidl} та кількістю зчитування відліків на кожен установку рейки (n), вимірне перевищення ($\Delta h_{пр}$) обчислювалось, як різниця відліків цифрового нівеліра на $i-1$ та i установках рейки для умови одноразового зчитування відліку (стовпець 4 табл. 2), або як різниця середньоарифметичних значень відліків за умови n -разового ($2 \leq n \leq 10$) зчитування відліків (у стовпці 7 табл. 2 наведені $\Delta h_{пр}$ для умови десятиразового зчитування відліків на кожній установці рейки). Далі обчислено від-

хилення v_i вимірних електронним нівеліром перевищень від дійсних – визначених експериментальним шляхом, як різниці відліків підйомного механізму на двох послідовних установках з точністю, яка в поставленій задачі дає змогу приймати перевищення за істинні (стовпці 5, 8 табл. 2), та обчислені СКП вимірних перевищень за формулою Гауса:

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}, \quad (3)$$

де n – кількість вимірних перевищень.

Таблиця 2

Обчислення СКП вимірювання перевищення електронним нівеліром
Calculation of MSE measuring of the exceeding by the electronic leveling

№ з/п	Установка підйомного механізму i	Відліки a_j^i , мм	СКП вимірювання перевищення за одноразового зчитування відліку на кожній установці рейки			СКП вимірювання перевищення за десятиразового зчитування відліку на кожній установці рейки		
			$\Delta h_{пр} = a_j^i - a_{j-1}^{i+1}$, мм	$v = \Delta h_{пр} - \Delta h_{теор}$, мм	v^2 , мм ²	$\Delta h_{пр} = \frac{\sum_{j=1}^{10} a_j^i}{10} - \frac{\sum_{j=1}^{10} a_j^{i+1}}{10}$, мм	$v = \Delta h_{пр} - \Delta h_{теор}$, мм	v^2 , мм ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
D = 5 м; E = 100 люксів, $\Delta h_{теор} = 1,00$ мм між i та $i+1$ установками підйомного механізму								
1	1	82,87	1,00	0,00	0,0000	1,00	0,00	0,0000
2		82,87	1,00	0,00	0,0000			
...				
10		82,86	1,00	0,00	0,0000			
11	2	81,87	1,01	0,01	0,0001	1,01	0,01	0,0001
12		81,87	1,02	0,02	0,0004			
...				
20		81,86	1,01	0,01	0,0001			
...
211	22	61,87	$m = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} = \pm 0,013$ мм;			$m = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} = \pm 0,010$ мм;		
212		61,87						
...		...						
220		61,87						
D = 10 м; E = 100 люксів, $\Delta h_{теор} = 1,00$ мм між i та $i+1$ установками підйомного механізму								
191	1	87,14	-1,04	-0,04	0,0016	-0,98	0,02	0,0004
192		87,09	-0,97	0,03	0,0009			
...				
200		87,11	-0,96	0,04	0,0016			
201	2	86,10	-1,02	-0,02	0,0004	-1,02	-0,02	0,0004
202		86,12	-1,01	-0,01	0,0001			
210		86,15	-1,03	-0,03	0,0009			
...				
371	19	67,23	$m = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} = \pm 0,014$ мм;			$m = \pm \sqrt{\frac{\sum v^2}{n}} = \pm 0,011$ мм;		
372		67,21						
...		...						
380		67,24						

Зазначимо, що дослідження точності зчитування відліку виконувались на віддальх до рейки від 5 до 30 м з кроком 5 м та при освітленостях величиною 80, 120, 150 та 360 люксів.

Похибка відліку містить близько 20 джерел [Пискунов, 1980], які ми в роботі не наводимо. Методика експерименту дала змогу практично усунути вплив усіх джерел похибок (абсолютна рівність пліч під час вимірювання перевищень, стала температура навколишнього середовища, малі величини перевищень – 0,5–1,0 мм, сталий кут нахилу рейки під час вимірювання перевищення, використання однієї рейки під час досліджень тощо), окрім похибки зчитування відліку ($m_{відл}$), зумовленої технологічними особливостями приладу. У табл. 2 перевищення на

станції обчислювалось за формулою (1) за умови $n_1 = n_2 = n$, тому $m_{відл}$ на задню та на передню рейки вважаємо однаковими і такими, що дорівнюють $m/\sqrt{2}$.

Величини похибок зчитування відліку визначені для умов 1-, 2-, 3-, 5-, 8- та 10-разового взяття відліків на кожній установці рейки для різних довжин променя D для високоточного нівеліра наведені в табл. 3.

Для того, щоб оцінити степінь лінійної кореляційної залежності між віддалю до рейки, освітленістю рейки, кількістю взяття відліків на кожну установку та $m_{відл}$, використано математичний апарат одно- та багатofакторного регресійного аналізу.

Таблиця 3

Залежність величини $m_{відл}$ від довжини плеча D та кількості взяття відліків на одній установці рейки (освітленість рейки 80 люкс) для високоточних нівелірів
Dependency of the dimension $m_{reading}$ on the length of arm D and the number of taking the readings (the rail illumination $E = 80$ lux) for the high-precision levels

Віддаль до рейки D (м)	Кількість взяття відліків n					
	1	2	3	5	8	10
5	0,009	0,008	0,008	0,008	0,008	0,007
10	0,010	0,009	0,009	0,009	0,008	0,008
15	0,017	0,015	0,015	0,013	0,013	0,012
20	0,021	0,017	0,017	0,015	0,012	0,012
25	0,031	0,026	0,025	0,021	0,022	0,020
30	0,034	0,032	0,031	0,028	0,027	0,026
50	0,095	0,088	0,086	0,078	0,071	0,070

Вплив кожного з наведених вище факторів b (довжини променя D , кількості взяття відліків n , освітленості рейки E) на точність зчитування відліку перевірявся однофакторним регресійним аналізом – знаходженням коефіцієнта кореляції між $m_{відл}$ та відповідним фактором впливу b за відомою [Корн, 1977] формулою:

$$r(m_{відл}, b) = \frac{\sum_{i=1}^k (m_{відл}^i - \bar{m}_{відл}) * (b^i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (m_{відл}^i - \bar{m}_{відл})^2 * \sum_{i=1}^k (b^i - \bar{b})^2}}, \quad (4)$$

де k – кількість пар $m_{відл}$ та b ; $\bar{m}_{відл}$, \bar{b} – відповідні середньоарифметичні значення величин $m_{відл}^i$ та b^i відповідно.

Результати перевірки існування лінійної залежності між величиною освітленості рейки E (в діапазоні від 80 до 360 лк) та $m_{відл}$ свідчать про слабкий кореляційний зв'язок між ними (коефіцієнт парної кореляції Пірсона $r = 0,34$).

Коефіцієнт кореляції між $m_{відл}$ та довжиною плеча D дорівнює 0,99 (висока залежність), а між $m_{відл}$ та кількістю взяття відліків n на кожній установці рейки $r = -0,85$ (висока зворотна залежність), що свідчить про чіткий попарний лінійний зв'язок. Тому ми виконали багатofакторний регресійний аналіз для встановлення математичної залежності сумарного впливу двох вищевказаних факторів на $m_{відл}$ (результати подано в табл. 4).

Таблиця 4

Результати статистичного дослідження впливу віддалі і кількості взяття відліків на $m_{відл}$
Results of the statistic research of the influence of distance and number of taken readouts on $m_{reading}$

$m_2 = -0,00097$	$m_1 = 0,00144$	$b = 0,001565$
$se_2 = 0,00049$	$se_1 = 0,00011$	$se_3 = 0,003792$
$r_2 = 0,80854$	$se_v = 0,01022$	
$F = 82,35$	$d_f = 39$	
$ss_{reg} = 0,01719$	$ss_{resid} = 0,063794$	

У табл. 4 m_1 і m_2 – коефіцієнти регресійного лінійного рівняння;

b – вільний член рівняння прямої;

se_1 і se_2 , se_3 – стандартні значення похибок для коефіцієнтів m_1 та m_2 та вільного члена b ;

r_2 – коефіцієнт детермінованості (квадрат коефіцієнта кореляції Пірсона, нормований від 0 до 1) – результат порівняння фактичних значень $m_{відл}$ та значень, отриманих з лінійного регресійного рівняння;

se_v – стандартна похибка визначення $m_{відл}$, використовуючи рівняння регресії;

F – статистика, яка використовується для встановлення випадковості взаємозв'язку між залежною та незалежними змінними;

d_f – степінь свободи v_2 (служить для знаходження F – критичного значення). Для обчислення степеня свободи v_1 використовували таку залежність [Кобзарь, 2006]:

$$v_1 = n - d_f - 1. \quad (5)$$

У нашому випадку степінь свободи $v_1 = 42 - 39 - 1 = 2$, критичне значення F дорівнює 3,2381. Оскільки значення $F = 82,35$ значно більше за критичне, то гіпотеза про відсутність зв'язку між відомими значеннями $m_{відл}$, D та n відхиляється. Значення вірогідності $F_{РАСП}(82,35;2;39) = 1,071E-16$ надзвичайно мале. Отже, рівняння регресії можна використовувати для прогнозування похибки зчитування відліку для цього типу приладів;

ss_{reg} – регресійна сума квадратів;

ss_{resid} – остаточно сума квадратів.

За результатами, наведеними в табл. 4, лінійна залежність $m_{відл}$ від D та n для високоточних цифрових нівелірів (табл. 3) математично описується виразом:

$$m_{відл}(мм) = 0,0014D(м) - 0,001n + 0,002. \quad (6)$$

Визначимо, чи корисний кожен коефіцієнт у рівнянні (6). Так, абсолютне t -значення коефіцієнту за змінної D становить 12,7, тоді як критичне значення t дорівнює 2,02 за $\alpha = 0,05$ та $v_2 = 39$. Оскільки абсолютні значення t більші за критичне, то змінна D важлива для прогнозування $m_{відл}$. Водночас абсолютне t -значення коефіцієнта, коли n дорівнює 1,99, що менше за критичне і свідчить про незначний

вплив коефіцієнта n на величину $m_{відл}$ для високоточних цифрових нівелірів.

Отже, як бачимо з табл. 4, величина квадрату коефіцієнта кореляції Пірсона $r_2=0,809$ близька до одиниці, табличне значення функції F за степеня довіри $\alpha = 0,05$ дорівнює 3,24, що значно менше за обчислене 82,35, а стандартні значення похибок для коефіцієнтів та вільного члена значно менші за самі похибки. Тож можна зробити висновок, що рівняння регресії (6) можна використовувати для знаходження похибки зчитування відліку для високоточних електронних нівелірів.

Графік залежності похибки зчитування відліку від довжини плеча та кількості зчитування відліків для високоточного нівеліра подано на рис. 3.

Аналогічно залежності (6) за результатами експериментальних досліджень отримано рівняння залежності $m_{відл}$ від D та n для точних цифрових нівелірів:

$$m_{відл}(мм) = 0,004D(м) - 0,007n + 0,042. \quad (7)$$

Графік, на якому відображена залежність (7), подано на рис. 4.

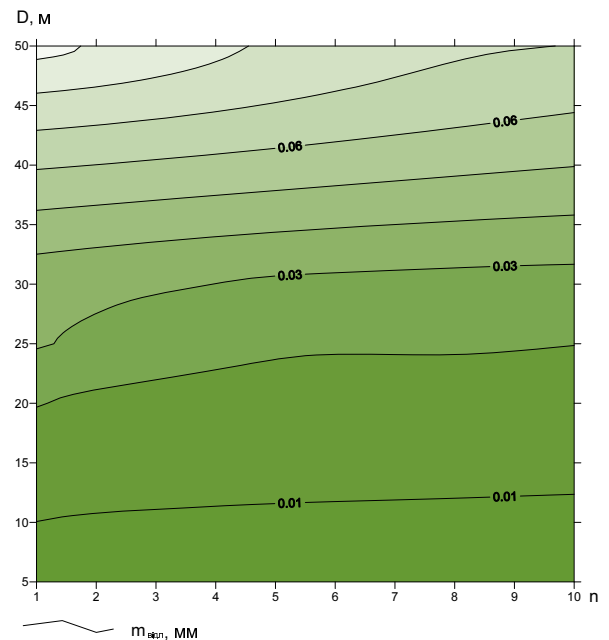


Рис. 3. Залежність похибки зчитування відліку від довжини плеча D та кількості зчитування відліків n для високоточних цифрових нівелірів
Fig. 3. Dependency of taken readout error on length of the arm D and on the number of taken readouts for the high-accuracy digital leveling

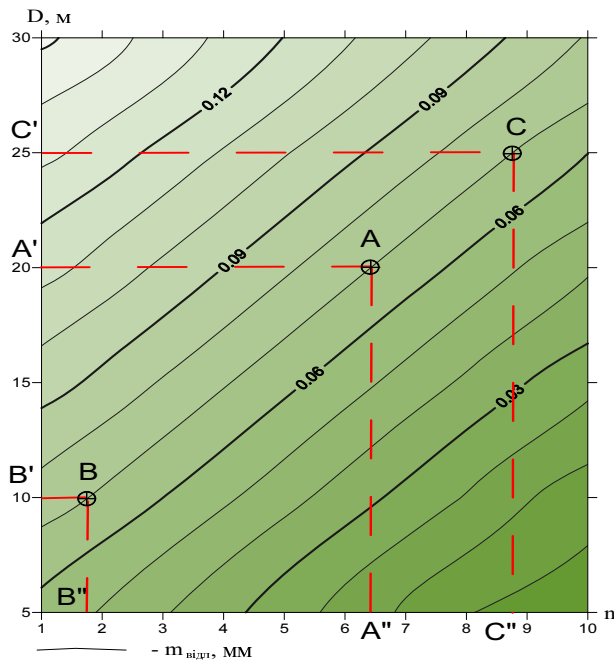


Рис. 4. Залежність похибки зчитування відліку від довжини плеча D та кількості зчитування відліків n для точних цифрових нівелірів

Fig. 4. Dependency of taken readout error on length of the arm D and on the number of taken readouts for the high-accuracy digital leveling

Припустимо, нам необхідно виміряти перевищення на станціях ходу з точністю $m = 0,1$ мм точним цифровим нівеліром. Тоді за умови рівноточності визначення відліків на задню та на передню рейки ($n_1 = n_2 = n$) матимемо, що

$$m_{\text{відл}} = \frac{m}{\sqrt{2}} = 0,07 \text{ мм}.$$

Користуючись графіком (рисунок 4) бачимо, що за $D = 10$ м для досягнення такої точності нам потрібно виконати як мінімум по 2 зчитування за кожного наведення, якщо $D = 20$ м потрібно 7 зчитувань, якщо $D = 25$ м – 9 зчитувань і т. д.

Висновки

Автори дослідили залежність величини $m_{\text{відл}}$ від довжини променя D, кількість зчитування відліків n та освітленості рейки E для цифрових нівелірів. Результати досліджень свідчать, що освітленість рейки в діапазоні $80 \text{ лк} < E < 360 \text{ лк}$ не впливає на точність зчитування відліку. Водночас $m_{\text{відл}}$ залежить від довжини плеча і кількості зчитувань рейки.

За результатами експериментальних досліджень та регресійного аналізу отриманих

даних встановлені рівняння функціональної залежності (6) та (7) для розрахунку $m_{\text{відл}}$ відповідно для високоточних та точних електронних нівелірів. Зазначимо, що для високоточних цифрових нівелірів $m_{\text{відл}}$ на досліджуваному діапазоні довжин пліч меншою мірою залежить від кількості зчитувань відліків, ніж для точних нівелірів. Використання рівнянь (6), (7) дає змогу оптимізувати трудовитрати на виконання польових робіт під час виконання високоточного геометричного нівелювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Бурак К. Дослідження роботи електронних приладів (віддалеміра LEICA DISTO™ A6, цифрового нівеліра SPRINTER 150M та електронного тахеометра SOKKIA SET 630R) під час різкої зміни температури приладу / К. Бурак, Я. Білецький, М. Гринішак, В. Ковтун, В. Михайлишин, О. Шпаківський, А. Яворський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – I (23). – С. 72–76.

Бурак К. Експериментальне дослідження впливу вібрації на результати високоточного нівелювання коротким променем цифровим нівеліром SDL30M / К. Бурак, О. Шпаківський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2011. – II (22). – С. 134–135.

Гайрабеков И. Г. Разработка способа геометрического нивелирования, учитывающего особенности электронных нивелиров и реек с Rab-кодовыми шкалами / И. Г. Гайрабеков, Ю. И. Пимшин // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – Изд. Северо-Кавказский государственный университет, 2010. – № 4 (25). – С. 22–25.

Зазуляк П. М. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань / П. М. Зазуляк, В. І. Гавриш, Е. М. Євсєєва, М. Д. Йосипчук. – Львів: Растр 7, 2007. – 408 с.

Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн – М.: Наука, 1977. – С. 639.

Пискунов М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений / М. Е. Пискунов. – М.: Недра, 1980. – 248 с.

Тревого І. Точність цифрового нівелювання з врахуванням додаткових переміщень рейок / І. Тревого, Є. Ільків, Ю. Ткаченко // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – Вип. 74. – С. 10–13.

Тревого І. Удосконалення методики нівелювання цифровим нівеліром / І. Тревого, Є. Ільків,

Д. Кухтар // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2012. – I (23). – С. 96–97.
 Эльясберг П. Е. Измерительная информация: сколько ее нужно? Как ее обрабатывать? / П. Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1983. – 207 с.

Helmut WOSCHITZ, Fritz K. BRUNNER and Hans HEISTER Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 2003, issue 128. – P. 11–17.

К. О. БУРАК¹, М. Я. ГРЫНИШАК²

¹ Кафедра инженерной геодезии, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Карпатская ул., 15, Ивано-Франковск, 76000, тел. (067) 34-25-436, ел. пошта Burak.cost@YANdex.ua

² Кафедра инженерной геодезии, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Карпатская ул., 15, Ивано-Франковск, 76000, тел. (098) 80-94-099, ел. пошта nikolaygrynishak@bigmir.net

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СЧИТЫВАНИЯ ОТСЧЕТА ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ НИВЕЛИРОВАНИИ КОРОТКИМ ЛУЧОМ ТОЧНЫМИ ЦИФРОВЫМИ НИВЕЛИРАМИ

Одним из современных методов наблюдения за осадками уникальных сооружений (фундаментов АЭС, высотных плотин ГЭС, ускорителей заряженных частиц, радиотелескопов) является высокоточное геометрическое нивелирование коротким лучом с использованием цифрового нивелира. Основой для разработки методики нивелирования является СКП (средняя квадратическая погрешность) взятия отсчета. При работе с цифровым нивелиром, в отличие от оптического, есть возможность без существенного увеличения трудоемкости измерений (практически и времени) определять отсчет на рейку как среднее арифметическое из n -считываний рейки. Выполнены исследования зависимости величины $m_{\text{вкл}}$ (средней квадратичной величины с n считываний) от длины луча D (в диапазоне от 5 до 30 м), количества считываний отсчетов n и освещенности рейки E (с целью как установление математической зависимости для подсчета $m_{\text{вкл}}$, так и определения оптимальной величины n). Исследование заключалось в измерении электронным нивелиром эталонных превышений, которые известны с точностью на порядок выше точности считывания отсчета нивелиром. Эталонные превышения задавались предварительно проверенным подъемным механизмом, который использовался для изменения высоты рейки относительно визирного луча нивелира и обеспечивал точность установки изменения высоты рейки $m = \pm 0,003$ мм. Погрешность за наклон рейки в результатах отсутствует. По результатам экспериментальных измерений установлено, что освещенность в диапазоне от 80 до 360 лк (люксов) не влияет на точность автоматического считывания отсчетов. В то же время существует четкая линейная зависимость $m_{\text{вкл}}$ от D и n , которая для высокоточного нивелира TOPCON DL-501 аппроксимируется уравнением $m_{\text{вкл}}(\text{мм}) = 0,0014D(\text{м}) - 0,001n + 0,002$. Для точного электронного нивелира Sprinter 150 М эта зависимость аппроксимируется уравнением $m_{\text{вкл}}(\text{мм}) = 0,004D(\text{м}) - 0,007n + 0,042$. Анализ показывает, что $m_{\text{вкл}}$ для точного нивелира, в отличие от высокоточного, в большей степени зависит от количества считываний отсчетов. Полученные зависимости позволяют разрабатывать оптимальные методики выполнения геометрического нивелирования и могут быть использованы при разработке нормативных документов.

Ключевые слова: геометрическое нивелирование цифровым нивелиром; СКП считывания отсчета; длина луча нивелирования; количество считываний отсчетов; освещенность рейки.

К. О. BURAK¹, М. YA. GRYNISHAK²

¹ Department Engineering geodesy of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Karpatska str., Ukraine, 76000, tel. (067) 34-25-436, e-mail Burak.cost@YANdex.ua

² Department Engineering geodesy of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas Ivano-Frankivsk, Karpatska str., Ukraine, 76000, tel. (098) 80-94-099, e-mail nikolaygrynishak@bigmir.net

RESEARCH OF ERROR READING REFERENCE TO GEOMETRIC LEVELING SHORT BEAM DIGITAL LEVELS

One of the modern methods of observation for unique buildings' precipitation (basements of nuclear power stations, high-level dams of hydroelectric power stations, charged particles accelerators, radio telescopes) is a high-precision geometric levelling by means of short beam with the use of digital level. The basis for the levelling method development is the AQE (average quadratic error) of taking a reading. The researches have been performed to define the dependence of value m_{reading} on the length of the beam D (ranging from 5 to 30 m), the number of taking the readings n and the rail E illumination. With the help of the electronic level, the study aimed at measuring the standard

exceedings is known to have an accuracy which is much higher than the accuracy of taking the readings by the level. Standard exceedings were given by the lifting mechanism, which had been tested before. This mechanism was used to change the height of the rail relatively to the sighting level beam as the starting point, and it ensured the accurate identification of the rail height changes $m = \pm 0.003$ mm. According to the results, the error of the rail inclination is absent. Based on the results of experimental measurements it has been found out that the illumination in the range from 80 to 360 lx (lux) does not affect the precision of the automatic taking the reading. At the same time there is a clear linear dependence m_{reading} on D and n , which is approximated for the high-precision level TOPCON DL- 501 by the equation $m_{\text{бітл}}(mm) = 0,0014D(m) - 0,001n + 0,002$. For precise electronic level Sprinter 150M this dependence is approximated by the equation $m_{\text{бітл}}(mm) = 0,004D(m) - 0,007n + 0,042$. The analysis shows that m_{reading} for the precise one to a great extent depends on the number of sensing the readings. Obtained dependences allow to develop optimum methodologies of conducting geometry levelling and can be applied in working out normative documents.

Key words: digital geometric leveling; UPC capture timer; the length of the beam leveling; the number of readings readings; lighting rails

REFERENCES

- Burak K., Bilets'kyi Ya., Hrynishak M., Kovtun V., Mykhaylyshyn V., Shpakivs'kyi O., Yavors'kyi A. Doslidzhennya roboty elektronnykh pryladiv (viddalemira LEICA DISTOTM A6, tsyfrovoho nivelira SPRINTER 150M ta elektronnoho takheometra SOKKIA SET 630R) pid chas rizkoyi zminy temperatury pryladu [Study of the operation of electronic devices (the rangefinder LEICA DISTOTM A6, digital level SPRINTER 150M and electronic total station SOKKIA SET 630R) in case of a sudden change in temperature of the device]. Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva [Recent advances in geodetic science and industry], 2012, Issue I (23), pp. 72–76.
- Burak K., Shpakivs'kyi O. Eksperymental'ne doslidzhennya vplyvu vibratsiyi na rezul'taty vysokotochnoho nivelyuvannya korotkym promenem tsyfrovym nivelirov SDL30M [Experimental study of the influence of vibration on the results of high-precision leveling by means of short beam digital level SDL30M]. Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva [Recent advances in geodetic science and industry], 2011, Issue II (22), pp. 134–135.
- Hayrabekov Y. H., Yu. Y. Pymshyn Razrabotka sposoba heometrycheskoho nyvelyrovannya, uchytyvayushcheho osobennosti elektronnykh nyvelyrov y reek s Rab-kodovymy shkalamy [Development of geometric leveling method, taking into account the peculiarities of electronic leveling and reek with Rab-coded scales] Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. [Bulletin of the North Caucasus State Technical University], 2010, Issue 4 (25), pp. 22–25.
- Zazulyak P. M., Havrysh V. I., Yevsyeyeva E. M., Yosypchuk M. D. Osnovy matematychnoho opratsyuvannya heodezychnykh vymiryuvan' [Basics of mathematical processing of geodetic measurements]. Lviv, Rastr 7, 2007, 408 p.
- Kobzar A. I. Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied Mathematical Statistics]. Moscow, Fizmatlit, 2006, 816 p.
- Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical directory for Scientists and Engineers]. – Moscow: Nauka, 1977. – 639 p.
- Piskunov M. Ye. Metodika geodezicheskikh nablyudenyi za deformatsiyami sooruzheniy [Technique of geodesic observations of constructions' deformations]. Moscow, Nedra, 1980, 248 p.
- Trevoho I., Il'kiv Ye, Tkachenko Yu. Tochne' tsyfrovoho nivelyuvannya z vrakhuvannyam dodatkovykh peremishchen' reyok [The precision of digital leveling taking into account the additional rails' movements]. [Geodesy, Cartography and Aerial Photography], 2011, Issue 74, pp. 10–13.
- Trevoho I., Il'kiv Ye., Kukhtar D. Udoskonalennya metody nivelyuvannya tsyfrovym nivelirov [Improvement of the method of leveling with the use of digital level]. Suchasni dosyahnennya heodezychnoyi nauky ta vyrobnytstva [Recent advances in geodetic science and industry], 2012, Issue I (23), pp. 96–97.
- Elyasberg P. Ye. Izmeritnaya informatsiya: skolko ee nuzhno? Kak ee obrabatyvat? [Measuring information: how much we need it? How to process it?]. Moscow, Nauka, 1983, 207 p.
- Helmut WOSCHITZ, Fritz K. BRUNNER and Hans HEISTER Scale Determination of Digital Levelling Systems using a Vertical Comparator, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 2003, Issue 128, pp. 11–17.

Надійшла 3.02.2014 р.