

ПРО СТІЙКІСТЬ РЕПЕРІВ ВИСОТНОЇ ОСНОВИ

Мета дослідження – оцінювання стійкості реперів висотної основи через порівняння наближеного та строгого методу опрацювання результатів повторних циклів нівелювання. Дослідження передбачає аналіз методів, що ґрунтуються на виборі найстабільнішого репера, відповідно до принципів “відносної” й “абсолютної” оцінки. Метою є також виявлення найефективнішого підходу до математичного опрацювання результатів нівелювання в умовах вільних геодезичних мереж, які характеризуються високим ризиком помилкової ідентифікації стабільних точок. Це насамперед стосується проблеми початкового вибору поверхні відліку, відносно якої необхідно розраховувати позначки реперів та їх вертикальні зміщення, а також самої оцінки стабільності реперів. Методика та результати. У статті розглянуто різні методи оцінювання стійкості реперів, які можна класифікувати на “відносні” та “абсолютні” залежно від критеріїв точності вимірювання. Подано математичні розрахунки для результатів вимірювань перевищень між реперами у кількох циклах нівелювання нівелірної мережі промислового майданчика, а також визначено граничні похибки для кожного репера. У результаті аналізу виявлено репери, що відповідають вимогам стійкості, та сформульовано критерії для визначення відносної стійкості та нестійкості реперів. Порівняння наближеного та строгого методів оцінювання стійкості реперів на основі результатів вимірювань показало, що застосування наближеного методу А. Костехеля є одним із найефективніших для визначення стійкості реперів. Строгий метод дає змогу точно і надійно визначити зміщення реперів, але може потребувати більше обчислювальних ресурсів. Виконані дослідження показали, що два методи, розглянуті в статті, узгоджуються за результатами визначення стійкості реперів. Наукова новизна. Стаття містить корисну інформацію для забезпечення точності моніторингу деформацій і стабільності будівельних конструкцій. Із використанням запропонованого універсального алгоритму і відкритого програмного коду опрацювання результатів вимірювань у повторних циклах нівелювань отримано надійну оцінку стійкості реперів висотної основи, що важливо під час виконання повторних геодезичних вимірювань на великих будівельних майданчиках для точного визначення осідань будівель і споруд.

Ключові слова: висотна стійкість репера, методи аналізу стійкості реперів, осідання будівель, вільна висотна мережа.

Вступ

Вивчення стійкості реперів висотної основи важливе в сенсі забезпечення надійності та точності моніторингу деформацій інженерних споруд, особливо у випадках, коли деформації пов’язані із вертикальними зміщеннями, що можуть спричинити непоправні наслідки для будівель та споруд. Мережі геодезичного контролю є вільними мережами, які містять дефекти даних [Chen, et al., 1990], тому правильна ідентифікація взаємно стабільних точок доволі складна, іноді навіть неможлива для великої кількості нестабільних точок. Хибна ідентифікація призводить до помилкового визначення базисних даних для розрахункових деформацій об’єкта і, як наслідок, до дезінформації. Ідентифікація взаємно стабільних точок – єдина серйозна проблема, і вона все ще є предметом зацікавлення фахових геодезистів.

Ключова увага до цього питання зумовлена необхідністю підвищення точності спостережень і стійкості самих реперів, які слугують базою для таких вимірювань. Тому моніторингу деформацій інженерних споруд завжди приділяється підвищена увага. Відомо, що вертикальні зміщення споруд переважно залежать від фізико-механічних властивостей ґрунтів і від випадкових факторів, що впливають на ґрунт: температура, вологість, зміна рівня ґрунтових вод. Це зумовлює необхідність вирішення завдання оцінювання стійкості реперів висотної основи для визначення деформацій верхнього прошарку ґрунту та фундаментів інженерних споруд. Безумовно, завдання актуальне, зважаючи на жорсткіші вимоги інструктивних положень до забезпечення стійкості як об’єктів, що будуються, так і тих, що експлуатуються, а також на численні факти переходу в аварійний стан будівель і споруд.

Спектр можливих деформацій доволі широкий. Можливі просідання, випучування, крени, деформації кручення, а також локальні розтягування і стиснення будинків і споруд. Тому виникає потреба у забезпеченні спостережень за різними об'єктами, особливо за об'єктами ГЕС та ГАЕС в енергетичній галузі. Важливо, щоб ці спостереження могли бути організовані в практично будь-яких умовах, з необхідною точністю, і були автономними. Останнє означає створення вільних мереж спостережень, із достатнім ступенем свободи для математичного опрацювання з необхідною точністю результатів.

У цій статті розглянуто оцінювання стабільності опорних реперів, від яких безпосередньо залежить надійність вимірювань осідань будівель та інженерних споруд. Надійність і точність результатів спостережень за осіданням фундаментів споруд значною мірою залежить від незмінності висотного положення вихідних реперів. Стійкість реперів періодично перевіряють, вимірюючи перевищення $h_1, \dots, h_i$. Зміна значень перевищень між реперами в повторних циклах вимірювань є випадковою і залежить передусім від їхньої стабільності.

Під час математичного опрацювання результатів повторних нівелювань виникають питання, які ще остаточно не вирішені у геодезичній літературі. Насамперед це стосується проблеми початкового вибору поверхні відліку, відносно якої необхідно розраховувати відмітки реперів та їх вертикальні зміщення, а також самої оцінки стабільності реперів. Ураховуючи складність задачі та багатозначність результатів у разі використання поточних методів оцінювання стійкості реперів, існує потреба в подальших дослідженнях для розроблення нових точніших та універсальніших підходів до визначення стабільності висотних реперів. Це може передбачати розвиток автоматизованих систем опрацювання даних, що дають змогу знижувати ризики впливу випадкових факторів на точність вимірювань та підвищувати ефективність таких систем у реальних умовах.

Методи оцінювання стійкості реперів висотної основи

Стабільність висотної мережі можна оцінити різними методами [Ганьшин, Стороженко, 1981;

Martusiewicz, 1982; Дьяков, 1992, 2009; Рабинович, 1997; Федосеев, 1977; Пилипюк, Ільків, 1986; Костецька та ін., 2011; Церклевич, Хом'як, 1997; Velsink, 2015]. Сьогодні у геодезичній літературі методи встановлення найстійкішого репера можна умовно розділити на дві групи: у першій за площину відліку приймають позначку найстійкішого репера (методи А. Соловйова, А. Костехеля, В. Мартусевича, Л. Срібнякової, І. Рунова) [Ганьшин, Стороженко, 1981; Martusiewicz, 1982], у другій вихідною площиною є середнє значення позначок усіх досліджуваних реперів (метод П. Марчака, В. Чернікова) [Дьяков, 2009]. Інша класифікація побудована на принципах, які умовно назвемо: “відносні” та “абсолютні”. Група методів “відносні” ґрунтується на критерії оцінювання точності вимірювання за концепцією різниці осідань. Група методів оцінювання “абсолютні” ґрунтується на критеріях оцінювання точності вимірювання за абсолютною похибкою осідання. До групи методів оцінювання “відносні” належать методи В. Карпенка і Я. Мартусевича [Martusiewicz, 1982], а до групи “абсолютні” – методи А. Костехеля, В. Чернікова [Ганьшин, Стороженко, 1981; Рабинович, 1997]. Під час детального розгляду зазначених методів виявлено їхні специфічні особливості. Одні методи ширше застосовують під час оцінювання осідань завдяки простоті алгоритму, але інші універсальніші – зі складним алгоритмом пошуку стійких реперів. Зауважимо, що порівняння методів виконано в різних роботах, які дали змогу продовжити дослідження в цьому напрямі через неоднозначність розв'язання задачі оцінювання стійкості реперів [Федосеев, 1977; Baselga, et al., 2015]. Якщо розглядати означену задачу в математичній постановці, а не в якісно наближеній, то потрібно відзначити виродженість матриці нормальних рівнянь, що призводить до багатозначності розв'язку. Стандартна процедура, яка дає змогу отримати розв'язок за допомогою псевдооберненої матриці, робить неявне припущення щодо досліджуваної нівелірної мережі через розподіл зміщення висоти між більшістю реперів мережі. І в цьому випадку необхідно використовувати додаткові умови, які стабілізують розв'язання

системи рівнянь [Nowel, 2019; Baselga, et al., 2015; Zienkiewicz et al., 2017].

Зазначимо також, що, враховуючи складність задачі та багатозначність отриманих результатів у разі використання уже відомих методів оцінювання стійкості реперів, існує потреба в подальших дослідженнях для розроблення нових, точніших та універсальніших підходів до визначення стабільності висотних реперів. Це може передбачати розвиток автоматизованих систем опрацювання даних, що дають змогу знижувати ризики впливу випадкових факторів на точність вимірювань та підвищувати ефективність таких систем у реальних умовах. В умовах сучасного будівництва та експлуатації інженерних споруд важливою стає можливість організації автономних мереж спостережень за реперами, що дає змогу виявляти та оцінювати деформації без постійної участі людського фактора. Такі системи можуть бути використані для довгострокового моніторингу стабільності реперів і підтримки постійного контролю за станом будівель.

Порівняльний аналіз оцінки стійкості реперів із застосуванням наближеного і запропонованого строгого методів

Розглянемо нівелірну мережу на промисловому майданчику, подану на рис. 1. У табл. 1 наведено результати визначених перевищень між реперами в п'яти циклах моніторингових вимірювань для двох варіантів наборів даних. Висота вихідного пункту відповідно для двох

варіантів – $R_{p1} = 10,4764$ м і $R_{p1} = 10,0537$ м. У табл. 1 позначені: довжина ходу – L , кількість штативів у ході – n .

Для визначення стійкості реперів із наближених методів найдоцільніше використовувати спосіб А. Костехеля [Ганьшин, Стороженко, 1981]. Теоретична основа методу полягає в порівнянні зрівняних значень перевищень для того самого ходу в попередньому та поточному циклах за формулою (1):

$$\Delta i = H_{ji} - H_{ji+1}, \quad (1)$$

де j – номер репера; I – цикл нівелювання. Найстійкішим репером вважають той, для якого сума різниці перевищень мінімальна, а його висоту, отриману в першому або попередньому циклі нівелювання, приймають за вихідну.

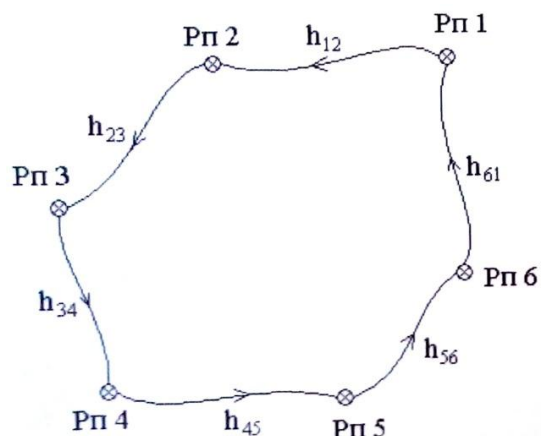


Рис. 1. Схема нівелірної мережі

Таблиця 1

Результати вимірювань перевищень у нівелірній мережі

№ циклу	Перевищення, мм											
	h_{12}		h_{23}		h_{34}		h_{45}		h_{56}		h_{61}	
Варіанти	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	118	522	750	94	0	-454	-3	131	-131	-128	-734	-165
2	117	519	745	93	0	-454	-2	128	-134	-122	-726	-164
3	112	520	749	92	-1	-456	1	124	-138	-125	-723	-155
4	123	524	747	96	0	-458	5	127	-137	-124	-738	-165
5	120	523	748	91	0	-450	-3	124	-134	-126	-731	-162
L , км	0,82	0,72	0,84	0,91	0,04	0,78	0,59	0,84	0,64	0,87	0,47	0,69
n	5	9	8	6	4	8	8	10	7	7	10	8

Стійкість або нестійкість репера визначають, порівнюючи Δ_i з граничною похибкою $\Delta_{\text{гран}}$, обчисленою за формулою (2)

$$\Delta_{\text{гран}} = k\sqrt{n}, \quad (2)$$

де K – точність визначення перевищення у ході;
 n – кількість штативів.

Наведемо послідовність виконання дій для визначення стійкого репера:

- визначаємо найстійкіший репер у поточному циклі;
- обчислюємо висоти реперів у мережі за вихідною висотою репера і перевищенням;

– розраховуємо ступінь відносної стійкості або нестійкості для кожного репера мережі;

– зрівноважуємо полігон для кожного циклу;

– визначаємо різниці Δ_i , приймаючи за вихідний репер по черзі (1, 2, 3, 4, 5) за формулою (1) для різних частин мережі (наприклад 1–2, 1–3, 1–4, 1–5, 1–6) та для різних циклів I–II, I–III, I–IV, I–V (див. табл. 2);

– обчислюємо $\Delta\Delta$ та $\Sigma\Delta\Delta$. Репер, для якого $\Sigma\Delta\Delta = \min$, буде вихідним;

Таблиця 2

Результати визначення різниць перевищень між циклами

Вихідний репер	Частина мережі	Цикли I–II		Цикли I–III		Цикли I–IV		Цикли I–V		$\Sigma\Delta\Delta$
		Δ	$\Delta\Delta$	Δ	$\Delta\Delta$	Δ	$\Delta\Delta$	Δ	$\Delta\Delta$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1–2	–1	1	–6	36	5	25	2	4	
	1–3	–6	36	–7	49	2	4	0	0	
	1–4	–6	36	–8	64	2	4	0	0	
	1–5	–5	25	–4	16	10	100	0	0	
	1–6	–8	64	–11	121	4	16	–3	9	
Вар. 1			162		286		149		13	610
Вар. 2			91		325		36		43	495
2	2–3	–5	25	–1	1	–3	9	–2	4	
	2–4	–5	25	–2	4	–3	9	–2	4	
	2–5	–4	16	2	4	5	25	–2	4	
	2–6	–7	49	–5	25	–1	1	–5	25	
	2–1	1	1	6	36	–5	25	–2	4	
Вар. 1			116		70		69		41	296
Вар. 2			31		209		52		63	355
3	3–4	0	0	–1	1	0	0	0	0	
	3–5	1	1	3	9	8	64	0	0	
	3–6	–2	4	–4	16	2	4	–3	9	
	3–1	6	36	7	49	–2	4	0	0	
	3–2	5	25	1	1	3	9	2	4	
Вар. 1			66		76		81		13	236
Вар. 2			35		141		116		39	331
4	4–5	1	1	4	16	8	64	0	0	
	4–6	–2	4	–3	9	2	4	–3	9	
	4–1	6	36	8	64	–2	4	–3	9	
	4–2	5	25	2	4	3	9	–1	1	
	4–3	0	0	1	1	0	0	–3	9	

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Bap. 1			66		94		81		28	269
Bap. 2			35		121		36		164	356
5	5–6	–3	9	–7	49	–6	36	–3	9	
	5–1	5	25	4	16	–10	100	0	0	
	5–2	4	16	–2	4	–5	25	2	4	
	5–3	–1	1	–3	9	–8	64	0	0	
	5–4	–1	1	–4	16	–8	64	0	0	
Bap. 1			52		94		289		13	448
Bap. 2			119		429		148		123	819
6	6–1	8	64	11	121	–4	16	3	9	
	6–2	7	49	5	25	1	1	5	25	
	6–3	2	4	4	16	–2	4	3	9	
	6–4	2	4	3	9	–2	4	3	9	
	6–5	3	9	7	49	6	36	3	9	
Bap. 1			130		220		61		61	472
Bap. 2			59		225		36		55	375

Таблица 3

Результати визначення висот реперів та граничної похибки

Параметр	Цикл нівелювання									
	I		II		III		IV		V	
Варіанти	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$H Pn1$	9,6084	9,4377	9,6144	9,4417	9,6154	9,4417	9,6064	9,4337	9,6084	9,4397
$\Delta_{1, \text{ мм}}$			6,0	4,0	7,0	4,0	-2,0	-4,0	0,0	2,0
$\Delta_{\text{гран, мм}}$			2,8	2,5	2,8	2,5	2,8	2,5	2,8	2,5
$H Pn2$	9,7264	9,9597	9,7314	9,9607	9,7274	9,9617	9,7294	9,9577	9,7284	9,9627
$\Delta_{2, \text{ мм}}$			5,0	1,0	1,0	2,0	3,0	-2,0	2,0	3,0
$\Delta_{\text{гран, мм}}$			2,0	2,7	2,0	2,7	2,0	2,7	2,0	2,7
$H Pn3$	10,4764	10,0537	10,4764	10,0537	10,4764	10,0537	10,4764	10,0537	10,4764	10,0537
$\Delta_{3, \text{ мм}}$			0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\Delta_{\text{гран, мм}}$			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
$H Pn4$	10,4764	9,5997	10,4764	9,5997	10,4754	9,5977	10,4764	9,5957	10,4764	9,6037
$\Delta_{4, \text{ мм}}$			0,0	0,0	-1,0	-2,0	0,0	-4,0	0,0	4,0
$\Delta_{\text{гран, мм}}$			1,8	2,5	1,8	2,5	1,8	2,5	1,8	2,5
$H Pn5$	10,4734	9,7307	10,4744	9,7277	10,4764	9,7217	10,4814	9,7227	10,4734	9,7277
$\Delta_{5, \text{ мм}}$			1,0	-3,0	3,0	-9,0	8,0	-8,0	0,0	-3,0
$\Delta_{\text{гран, мм}}$			2,5	2,8	2,5	2,8	2,5	2,8	2,5	2,8
$H Pn6$	10,3424	9,6027	10,3404	9,6057	10,3384	9,5967	10,3444	9,5987	10,3394	9,6017
$\Delta_{6, \text{ мм}}$			-2,0	3,0	-4,0	-6,0	2,0	-4,0	-3,0	-1,0
$\Delta_{\text{гран, мм}}$			2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

– надалі виконуємо обчислення висот реперів відносно вихідного репера № 3 (див. табл. 3);

– обчислюємо нев'язку між циклами та граничну нев'язку (див. табл. 3).

$\Delta = H_i - H_I$, де H_i – висота репера у поточному циклі ($i = \text{II}, \dots, \text{V}$), H_I – висота репера у першому циклі. $\Delta_{\text{гран}} = 0,9 \text{ мм} \sqrt{n}$.

Формуємо табл. 4, визначаємо та аналізуємо відносну стійкість пунктів у кожному циклі. Границю відносної стійкості реперів обчислюємо за формулою:

$$N = |\Delta_{\text{гран}} / \Delta_i| > 1. \quad (3)$$

Відносна нестійкість

$$J = |\Delta_{\text{гран}} / \Delta_i| < 1. \quad (4)$$

Обчислюємо відносну стійкість реперів відносно вихідного репера у всіх циклах I–II, I–III, I–IV, I–V для кожного із реперів.

За результатами обчислень можна зробити висновок, що згідно зі всіма циклами вимірювань перевищень у нівелірній мережі є лише один стійкий репер – № 4 та вихідний репер № 3.

Таблиця 4

Результати визначення стійкості або нестійкості реперів

Номер репера	Обернена вага ходу		Зміна висоти репера $\Delta = H_i - H_I$		$\Delta_{\text{допуст}} = 0,9 \cdot \sqrt{n}$, мм		Межа стійкості $N = \frac{\Delta_{\text{гран}}}{\Delta_i}$			
Варіант	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>Цикл I–II з шістьма реперами (вихідний Рп 3)</i>										
4	4	8	0,0	0,0	1,8	2,5	нескін.	нескін.	стійкий	стійкий
5	8	10	1,0	–3,0	2,5	2,8	2,5	0,9	стійкий	нестійкий
6	7	7	–2,0	3,0	2,4	2,4	1,2	0,8	стійкий	нестійкий
1	10	8	6,0	4,0	2,8	2,5	0,5	0,6	нестійкий	нестійкий
2	5	9	5,0	1,0	2,0	2,7	0,4	2,7	нестійкий	стійкий
<i>Цикл I–III з шістьма реперами (вихідний Рп 3)</i>										
4	4	8	–1,0	–2,0	1,8	2,5	1,8	1,3	стійкий	стійкий
5	8	10	3,0	–9,0	2,5	2,8	0,8	0,3	нестійкий	нестійкий
6	7	7	–4,0	–6,0	2,4	2,4	0,6	0,4	нестійкий	нестійкий
1	10	8	7,0	4,0	2,8	2,5	0,4	0,6	нестійкий	нестійкий
2	5	9	1,0	2,0	2,0	2,7	2,0	1,3	стійкий	стійкий
<i>Цикл I–IV з шістьма реперами (вихідний Рп 3)</i>										
4	4	8	0,0	–4,0	1,8	2,5	нескін.	0,6	стійкий	стійкий
5	8	10	8,0	–8,0	2,5	2,8	0,3	0,4	нестійкий	нестійкий
6	7	7	2,0	–4,0	2,4	2,4	1,2	0,6	стійкий	нестійкий
1	10	8	–2,0	–4,0	2,8	2,5	1,4	0,6	стійкий	нестійкий
2	5	9	3,0	–2,0	2,0	2,7	0,7	1,3	нестійкий	стійкий
<i>Цикл I–V з шістьма реперами (вихідний Рп 3)</i>										
4	4	8	0,0	4,0	1,8	2,5	нескін.	0,6	стійкий	нестійкий
5	8	10	0,0	–3,0	2,5	2,8	нескін.	0,9	стійкий	нестійкий
6	7	7	–3,0	–1,0	2,4	2,4	0,8	2,4	нестійкий	стійкий
1	10	8	0,0	2,0	2,8	2,5	нескін.	1,3	стійкий	стійкий
2	5	9	2,0	3,0	2,0	2,7	1,0	0,9	стійкий	нестійкий

Порівняємо тепер отримані результати визначення стійкості реперів нівелірної мережі зі строгим способом, який ґрунтується на визначенні ваг та матричних обчисленнях із розв'язанням лінійних рівнянь методом LU розкладу [Гантмахер, 1967].

Нижче викладено запропонований поетапний алгоритм вирішення означеного завдання пошуку стійкого репера у висотній мережі в програмному коді.

1. Вихідні дані в коді

L (довжини маршрутів). Містить довжини нівелірних маршрутів у кілометрах. Використовується для обчислення ваг (що менша довжина, то більша вага). N (кількість вимірювань). Враховується під час обчислення ваг для точнішої оцінки $\bar{h}$ (перевищення між реперами) в табл. 1, де кожен рядок – перевищення (у мм) між реперами для окремого циклу вимірювань. Кожен стовпець відповідає маршруту між двома реперами H_{Rp} (висота вихідного репера).

2. Обчислення середніх перевищень

Функція `calculateAverage` $\bar{h}$ обчислює середні перевищення для кожного маршруту.

3. Обчислення ваг маршрутів

Обчислює вагу для кожного маршруту із урахуванням кількості вимірювань n та довжини маршруту L .

4. Побудова матриці коефіцієнтів A

Функція `buildCoefficientMatrix` створює матрицю коефіцієнтів A , на діагоналі якої розташовані ваги маршрутів:

$$A = \begin{bmatrix} w_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & w_n \end{bmatrix},$$

$$\text{де } w_i = \frac{n_i}{L_i}.$$

5. Формування вектора правих частин

Формує вектор правих частин B для системи рівнянь $A \cdot \Delta H = B$ (у нашому випадку $A \cdot \Delta H = -\bar{h}$).

6. Розв'язання системи рівнянь

Розв'язує систему лінійних рівнянь $A \cdot \Delta H = B$. Результат: масив (у міліметрах), який містить поправки до висот кожного репера:

$$\Delta H_i = -\frac{\bar{h}_i}{w_i}.$$

7. Визначення стійкості реперів

Обчислює стійкість кожного репера як відношення поправки ΔH_i у висоту репера до значення ваги w_i . Результат: масив, що відображає відносну стійкість реперів (у міліметрах).

8. Обчислення скоригованих абсолютних висот

Додає поправки до кожного маршруту. Поправки до висот (до вихідної висоти $Rp1$) і переводить їх у метри.

9. Результати, які виводить програма (табл. 5)

Середні перевищення (H): середнє значення перевищень для кожного маршруту. *Поправки до висот (ΔH):* значення поправок до висот реперів. *Скориговані абсолютні висоти.* *Стійкість реперів:* відносна стабільність кожного репера.

Таблиця 5

Результати обчислень

Репер	Середні перевищення, м		Поправки до висот (ΔH), мм		Скориговані абсолютні висоти, м		Стійкість реперів	
Варіант	1	2	1	2	1	2	1	2
$Rp1$	118,0	521,6	-19,3	-41,7	10,4570	10,0120	3,1	3,3
$Rp2$	747,8	93,2	-78,2	-14,1	10,3981	10,0396	8,1	2,1
$Rp3$	-0,2	-454,4	0,0	44,3	10,4764	10,0989	0,0	4,3
$Rp4$	-0,4	126,8	0,0	-10,6	10,4764	10,0430	0,0	0,9
$Rp5$	-134,8	-125,0	12,3	15,5	10,4887	10,0692	1,1	1,9
$Rp6$	-730,4	-162,2	34,0	13,9	10,5104	10,0677	1,6	1,2

Висновки

У статті розглянуто два основні підходи до оцінювання стійкості реперів висотної основи: методи, що ґрунтуються на виборі позначки висоти найстійкішого репера або середнього значення висот усіх реперів, а також “відносні” та “абсолютні” методи оцінювання. Розгляд цих методів дає змогу вибрати оптимальний підхід залежно від умов спостережень і точності вимірювань. Однак необхідне удосконалення методів, що дасть змогу точніше оцінити стабільність реперів, особливо в умовах промислових майданчиків, де фактори деформацій можуть бути складнішими. Порівняння наближеного та строгого методів оцінювання стійкості реперів на основі результатів вимірювань показало, що застосування методу А. Костехеля є одним із найефективніших для визначення стійкості реперів. Строгий метод дає змогу точно і надійно визначити зміщення реперів, але може потребувати більше обчислювальних ресурсів. Наближені методи, як правило, простіші в реалізації, однак їхня точність може бути недостатньою для складних випадків. Аналіз різниць перевищень між циклами нівелювання дає змогу точніше оцінити стійкість реперів. Визначення граничної похибки перевищень і порівняння її із отриманими даними дає можливість чіткіше класифікувати репери як стійкі або нестійкі. Застосування такої методики для кожного циклу вимірювань допомагає у виборі найстійкішого репера, що критично важливо для забезпечення точності та достовірності результатів. Виконані дослідження показали, що два методи, розглянуті в статті, дали однакові результати визначення стійкості реперів.

Для забезпечення максимальної точності та надійності під час моніторингу деформацій споруд рекомендовано застосовувати комбінацію різних методів оцінювання стійкості реперів. Використання запропонованого універсального і строгого алгоритму дає змогу досягти надійніших результатів в оцінюванні стійкості реперів, що важливо під час виконання повторних геодезичних вимірювань у нівелірних мережах на великих будівельних майданчиках для визначення осідань будівельних споруд.

Список літератури

- Гантмахер Ф. Р. (1967). Теория матриц. М.: Наука. 576 с.
- Ганьшин В. Н., Стороженко А. Ф. (1981). Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов. Недра, 215 с.
- Дьяков Б. Н. (1992). Анализ устойчивости реперов свободной нивелирной сети. *Геодезия и картография*. № 4. С. 15–17.
- Дьяков Б. Н. (2009). Сравнительный анализ способов Костехеля и Марчака. *Маркшейдерский вестник*. № 6. С. 43–46.
- Костецька Я., Озімбловський Р., Турчин Н. (2011). Дослідження методів визначення нестабільності висот реперів у нівелірних мережах. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Вип. 1(21). С. 121–124. <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3166>
- Рабинович И. Е. (1977). Уравнивание свободных сетей и задача контроля устойчивости высотной основы. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*, вып. 4. С. 70–78.
- Пилипюк Р. Г., Ільків Є. Ю. (1986). Дослідження стійкості реперів висотної основи методом послідовних наближень. *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*, вип. 44. С. 70–75. <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-44-1986/investigation-steadiness-level-signs-methods>
- Федосеев Ю. Е. (1977). Анализ способов исследования по геодезии, картографии и аэрофотосъемке. С. 39–49.
- Церклевич А., Хом'як В. (1997). Аналіз стійкості пунктів вихідної висотної мережі. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. С. 101–104.
- Baselga, S., García-Asenjo, L., & Garrigues, P. (2015). Deformation monitoring and the maximum number of stable points method. *Measurement*, 70, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.034>
- Chen, Y. G., Chrzanowski, A., & Secord, J. M. (1990). A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys. *Cism. J. ACSGS*, 44(2): 141–149. <https://doi.org/10.1139/geomat-1990-0016>
- Martusiewicz J. (1982). Podstawowy zaznaczenia premieszczen' geodezyjnych-GIK. Warszawa.
- Nowel, Kr. (2019). Squared Msplit(q) S-transformation of control network deformations. *Journal of Geodesy*, 93(7), 1025–1044. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1221-4>
- Velsink, H. (2015). On the deformation analysis of point fields. *Journal of Geodesy*, 89(11), 1071–1087. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0835-z>
- Zienkiewicz, M. H., Hejbudzka, K., & Dumalski, A. (2017). Multi split functional model of geodetic observations in deformation analyses of the Olsztyn Castle. *Acta Geodyn. Geomater*, 14(2), 195–204. <https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0003>

Anatolii TSERKLEVYCH^a, Roman TRETYAK, Olga SMIRNOVA, Tetyana KORLIATOVYCH

Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine,
e-mail: ^a anatoltser@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8398-3860>.

ABOUT THE STABILITY OF THE ALTITUDE BASE BENCHMARKS

The purpose of the study is to assess the stability of the height base benchmarks by comparing the approximate and strict methods of processing the results of repeated leveling cycles. The study involves the analysis of methods based on selecting the most stable benchmark, utilizing the principles of “relative” and “absolute” evaluation. The goal is also to identify the most efficient approach to the mathematical processing of leveling results within free geodetic networks, which pose a high risk of false identification of stable points. This issue mainly concerns the initial selection of the reference surface, which is essential for calculating the benchmark marks, their vertical displacements, and assessing the stability of the benchmarks themselves. Methods and results. The article considers various methods for assessing the stability of benchmarks, which can be classified into “relative” and “absolute”, depending on the accuracy measurement criteria. Mathematical calculations are presented for the measurement results of the elevations between benchmarks in several leveling cycles of the leveling network at the industrial site. The maximum errors for each benchmark are determined. Through this analysis, benchmarks that meet the stability requirements were identified, and criteria were established for assessing the relative stability and instability of benchmarks. A comparison of the approximate and strict methods for evaluating benchmark stability, based on the measurement results, showed that the approximate method developed by A. Kostekhel is one of the most efficient approaches for determining the benchmark stability. The strict method allows for the accurate and reliable determination of the benchmark displacement; however, it may require more computational resources. The studies showed that the two methods considered in the article agree on the results of determining the benchmark stability. Scientific novelty. The article contains valuable information for ensuring the accuracy of monitoring deformations and the stability of building structures. By utilizing the proposed universal algorithm and open-source software to analyze measurement results from repeated leveling cycles, we accurately assessed the stability of benchmark heights. This assessment is vital when performing repeated geodetic measurements on large construction sites, as it ensures the precise determination of building and structure settlement.

Key words: benchmark height stability, methods for analyzing the benchmark stability, building settlement, free height network.

Надійшла 06.04.2025 р.