

Застосування теорії кінематичних коефіцієнтів для визначення короткоперіодичних зміщень Терепле-Ріцької ГЕС

Тетяна Грицюк

Кафедра інформаційних систем та мереж, Національний університет "Львівська політехніка", УКРАЇНА, м. Львів, вул. С.Бандери, 12, E-mail: berezko@gmail.com (стиль Affiliation)

Abstract – The investigation of the short-periodical intensity and deformation of the displacement of support by help the electronic tachymeter Leica TPS 1201 was done. The mathematical tool of the determination of the displacement of support of the penstock was developed. The real results of the displacement of support of the penstock on the axis of the coordinate H was received. Place here short abstract in English (please do not exceed 100 words) (сміть Abstract).

Терепле-Ріцька ГЕС (ТРГ) розташована в Карпатах, в 35 кілометрах на північ від районного центру м. Хуст, Закарпатської області. ТРГ є гідроелектростанцією дериваційного типу. Дериваційні ГЕС будуються як правило в гірських районах, тому що для їхнього функціонування потрібні значні перепади рельєфу. Між рікою Терепля і рікою Ріка споруджено дериваційний тунель довжиною 3,7 км. Вода з наповненого водосховища по дериваційному тунелю, прокладеному в гірському масиві, поступає в напірний трубопровід і на турбогенератори (див. рис.1). Таким чином води Тереплі через Терепле-Ріцьку ГЕС потрапляють в ріку Ріка. Максимальне використання води складає 18 м³/сек. [1].



1, 2, 3, 4 – геодетичні пункти на анкерних опорах напірного трубопроводу
0 – станція спостереження

Рис.1. Схема Терепле-Ріцького гідровузла

Експлуатація ГЕС має циклічний характер, який залежить від добового споживання електроенергії. Це приводить до добових циклів навантаження в напірному трубопроводі, які можуть призводити до короткоперіодичних зміщень трубопроводу. Для вивчення короткоперіодичних зміщень нами було проведено цілодобові виміри за допомогою роботизованого електронного тахеометра Leica TPS 1201. Це роботизований тахеометр, що дає можливість проводити високоточні короткоперіодичні кутові та лінійні виміри [2].

Виміри тахеометром проводились з однієї станції «0» розташованої на даху машинного залу ТРГ (мал. 1.). на чотири анкерних опори з встановленими відбивачами. Вимірювання виконувались з періодом 0,5 год. в автоматичному режимі з послідовним наведенням на відбивачі 1-4. Для кожного вимірюваного

вектора, були визначені його проекції в умовній топоцентричній системі координат на осі x, y, h. Аналіз результатів вимірів підтверджує гармонічні зміни приростів координат по кожному вектору протягом доби. Для прикладу на рисунку 2 представлена зміна перевищень по 4-ом опорам.

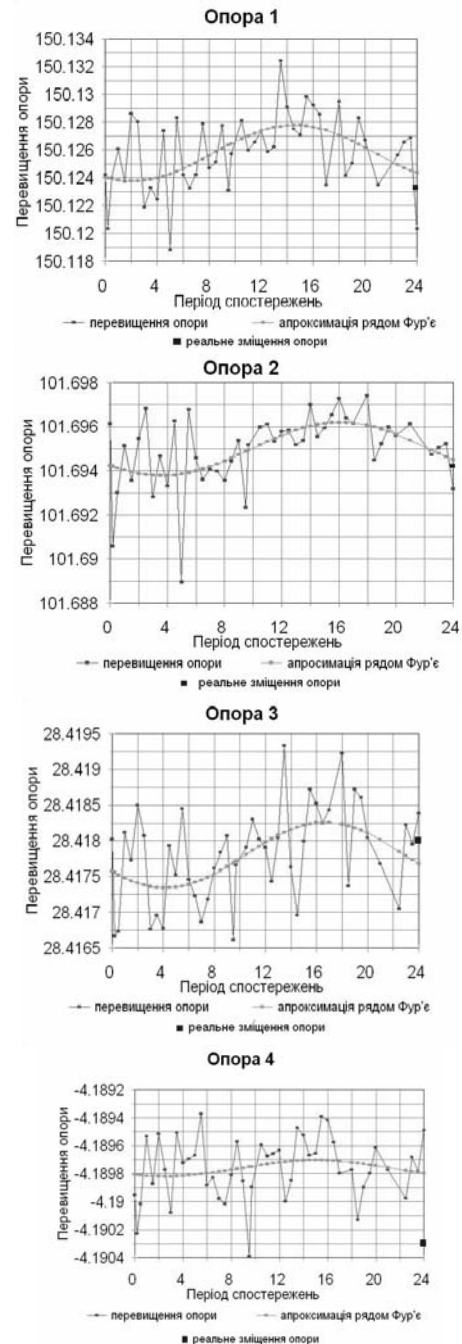


Рис. 2. Зміни перевищень між базовою станцією і опорами напірного трубопроводу і їх апроксимація рядом Фур'є.

Оскільки результати вимірів ми отримали відносно базової станції (тахеометра), який ми приймали нерухомим, то ми отримуємо суб'єктивний результат, про реальні зміщення і деформації напірного трубопроводу. Електронний тахеометр також знаходиться на будівлі ГЕС (напірному трубопроводі), і та само він може зміщуватись.

Виникає задача визначення реальних зміщень напірного трубопроводу, які не залежать від вибору нерухомого пункту (електронного тахеометра), і є проявом його короткоперіодичних деформацій та мають небезпечний вплив на стійкість фундаменту. Для розв'язку цієї задачі скористаємося теорією кінематичних коефіцієнтів, яка теоретично обґрунтована у роботі [3].

В зв'язку з тим, що зміна приростів координат виміряних векторів носить періодичний характер протягом доби, нами була виконана апроксимація цих зміщень рядом Фур'є, обмежена першими його членами.:

$$\Delta H_i = a_i + s_i \cdot \sin(t) + c_i \cdot \cos(t). \quad (1)$$

Де t – час (год).

Результати апроксимації представлені на рис. 2.

Для прикладу, використаємо висотну складову.

Координати по осях X, Y змінюються ідентично.

a_i, s_i, c_i - коефіцієнти гармонічного ряду.

Основною проблемою теорії кінематичних коефіцієнтів є розподіл у координати точок, поправок у виміряні величини. Для розв'язку цієї задачі визначаємо з вимірів прирости координат між точками або їх зміну між циклами спостережень

$\delta x_{i,j}, \delta y_{i,j}, \delta h_{i,j}$ де i, j - номери точок, на які опирається даний вектор [3]. Однак

$$\delta x_{i,j} = \Delta X_j - \Delta X_i, \quad \delta y_{i,j} = \Delta Y_j - \Delta Y_i,$$

$$\delta h_{i,j} = \Delta H_j - \Delta H_i, \quad (2)$$

де $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta H_i$ та $\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta H_j$ зміни координат точок i та j між циклами спостережень.

Задача визначення величин $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta H_i, \Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta H_j$, за значеннями $\delta x_{i,j}, \delta y_{i,j}, \delta h_{i,j}$ не має однозначного розв'язку.

Оскільки опрацювання кінематичних мереж виконують за результатами значної кількості повторних циклів вимірів, то на параметри $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta H_i$ в рівняннях (2) накладемо такі умови [3]:

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta X_j} = \frac{K_{xi}}{K_{xj}}, \quad \frac{\Delta Y_i}{\Delta Y_j} = \frac{K_{yi}}{K_{yj}}, \quad \frac{\Delta H_i}{\Delta H_j} = \frac{K_{hi}}{K_{hj}}, \quad (3)$$

де $K_{xi}, K_{xj}, K_{yi}, K_{yj}, K_{hi}, K_{hj}$ - коефіцієнти, що характеризують кінематику точок по відповідних осях координат, назвемо їх нормованими кінематичними коефіцієнтами. Для їх визначення введемо поняття

$\nabla x_{i,j}, \nabla y_{i,j}, \nabla h_{i,j}$ - середніх квадратичних відхилень приростів координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta H$ між точками i та j за весь період спостережень. Подано формулу для параметра $\nabla h_{i,j}$:

$$\nabla h_{i,j}^k = \sqrt{\frac{\left(\sum_{l=1}^k \Delta h_{i,j}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \Delta h_{i,j}^l}{k} \right)^2}{k}}, \quad (4)$$

де $\Delta h_{i,j}^l$ - виміряні прирости координати H між точками i та j , k - порядковий номер останнього циклу спостережень, а l - порядковий номер поточного циклу спостережень, $l = 1 \dots n$. Параметри $\nabla x_{i,j}, \nabla y_{i,j}$ обчислюються за аналогічними виразами.

Оскільки частота вимірів є висока, то ми можемо представити функцію (4) неперервною, тоді інтегральний вираз середніх квадратичних відхилень проєкцій виміряних векторів між точками на відповідну координатну вісь набуває вигляду:

$$\nabla_{H_i} = \sqrt{\frac{\int_{\alpha}^{\beta} (a_i + s_i \cdot \sin(t) + c_i \cdot \cos(t) - \frac{\int_{\alpha}^{\beta} (a_i + s_i \cdot \sin(t) + c_i \cdot \cos(t)) dt}{\beta - \alpha})^2 dt}{\beta - \alpha}} \quad (5)$$

Де α, β - початок та кінець інтервалу спостережень. Якщо візьмемо добовий інтервал спостережень, то для спрощення трансформуємо $\alpha = 0$, а $\beta = 2\pi$. Тоді вираз (5) набуває такого вигляду:

$$\nabla_{H_i} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{(c_i^2 + s_i^2)}}{2} \quad (6)$$

Базову станцію ми приймаємо за нульову точку, а інші за нумерацією опор. Нормовані коефіцієнти кінематики точки 0 для відповідної осі координат, використані у виразі (3), обчислюються із залежності [3]:

$$K_{H_0} = \frac{\mathfrak{R}_{H_0}}{\sum_{i=1}^n \mathfrak{R}_{H_n}}, \quad (7)$$

n - загальна кількість точок у мережі, $i = 1 \dots n$. \mathfrak{R}_0 - ненормований кінематичний коефіцієнт точки 0, який для осі H є:

$$\mathfrak{R}_{H_0} = \frac{\sum_{i=1}^n \nabla h_i}{n}, \quad (8)$$

а з врахуванням (6)

$$\mathfrak{R}_{H_0} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sum_{i=1}^n (\sqrt{c_i^2 + s_i^2})}{2 \cdot n} \quad (9)$$

Нормований коефіцієнт кінематики ϵ

$$K_{H_0} = \frac{1}{n+1}. \quad (10)$$

\mathfrak{R}_i - ненормований кінематичний коефіцієнт анкерної опори i , який для осі H виражається:

$$\mathfrak{R}_{H_i} = \nabla H_i \quad (11)$$

а з врахуванням (6)

$$\mathfrak{R}_{H_i} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{c_i^2 + s_i^2}}{2} \quad (12)$$

Відповідно

$$\sum_{i=1}^n \mathfrak{R}_{H_i} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2 \cdot n} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{c_i^2 + s_i^2} \quad (13)$$

Нормовані коефіцієнти кінематики точки i для відповідної осі координат, використані у виразі (5), обчислюються із залежності:

$$K_{H_i} = \frac{\mathfrak{R}_{H_i}}{\sum_{i=1}^n \mathfrak{R}_{H_i}} = \frac{n \cdot \sqrt{c_i^2 + s_i^2}}{(n+1) \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{c_i^2 + s_i^2}}, \quad (14)$$

Далі знаходимо середньовагове зміщення кожної пари точок $0-i$, де $i=1..n$ по відповідних осях за формулою з роботи [3]:

$$D_{H_i,0} = \frac{(K_{H_i} - K_{H_0}) \delta_{H_i,0}}{2(K_{H_i} + K_{H_0})} = \frac{c_i \cdot \left(n \cdot \sqrt{c_i^2 + s_i^2} - \sum_{i=1}^n \sqrt{c_i^2 + s_i^2} \right)^2}{2 \cdot \left(n^2 \cdot c_i^2 + n^2 \cdot s_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{c_i^2 + s_i^2} \right)^2 \right)} \quad (15)$$

де $\delta_{H_i,0}$ - зміна проекції вимірних векторів $i-0$ між сусідніми циклами спостережень на відповідну координатну вісь.

Також знаходимо середньовагове зміщення кожної пари точок $i-j$, де $i=1..n$, $j=i..n$ по відповідних осях за формулою з роботи [3]:

$$D_{H_i,j} = \frac{(K_{H_i} - K_{H_j}) \delta_{H_i,j}}{2(K_{H_i} + K_{H_j})} =$$

$$= \frac{(c_i - c_j) \cdot \left(\sqrt{c_i^2 + s_i^2} - \sqrt{c_j^2 + s_j^2} \right)^2}{2 \cdot (c_i^2 - c_j^2 + s_i^2 - s_j^2)} \quad (16)$$

де $\delta_{H_i,j}$ - зміна проекції вимірних векторів $i-j$ між сусідніми циклами спостережень на відповідну координатну вісь.

Середньовагове зміщення по одній із координатних осей мережі, рівне:

$$\delta \delta_H = \frac{\sum_{i=1}^n D_{H_i,0}}{n} + \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D_{H_i,j}}{n \cdot (n-1)} = \frac{2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{(c_i - c_j) \cdot (\sqrt{\gamma_i} - \sqrt{\gamma_j})}{2 \cdot (\sqrt{\gamma_i} + \sqrt{\gamma_j})} \right) + (n-1) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{c_i \cdot \left(n \cdot \sqrt{\gamma_i} - \sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i} \right)}{2 \cdot \left(n \cdot \sqrt{\gamma_i} + \sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i} \right)} \right)}{n \cdot (n-1)} \quad (17)$$

де $\gamma_i = (c_i^2 + s_i^2)$, а $i=0..n$, $j=i..n$

Проекція середнього зміщення напірного трубопроводу на відповідну координатну вісь, визначена з результатів вимірів, при умові нерухомості тахеометра, обчислюється із виразу:

$$\Delta \Delta_H = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_H}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n} \quad (18)$$

Різниця між середнім зміщенням напірного трубопроводу по відповідній осі координат і визначеним із результатів вимірів обчислюється із виразу:

$$\delta \Delta_H = \Delta \Delta_H - \delta \delta_H = (n-1) \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^n c_i - \sum_{i=1}^n \frac{c_i \cdot \left(n \cdot \sqrt{\gamma_i} - \sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i} \right)}{2 \cdot \left(n \cdot \sqrt{\gamma_i} + \sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i} \right)} \right) - 2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{(c_i - c_j) \cdot (\sqrt{\gamma_i} - \sqrt{\gamma_j})}{2 \cdot (\sqrt{\gamma_i} + \sqrt{\gamma_j})} \right)}{n \cdot (n-1)} \quad (19)$$

Зміщення по відповідній осі координат i -тої точки, визначається за виразом:

$$\delta H_i = \Delta H_i - \Delta \Delta_H + \delta \delta_H = (n-1) \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^n c_i - \sum_{i=1}^n \frac{c_i \cdot \left(n \cdot \sqrt{\gamma_i} - \sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i} \right)}{2 \cdot \left(n \cdot \sqrt{\gamma_i} + \sum_{i=1}^n \sqrt{\gamma_i} \right)} \right) - 2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{(c_i - c_j) \cdot (\sqrt{\gamma_i} - \sqrt{\gamma_j})}{2 \cdot (\sqrt{\gamma_i} + \sqrt{\gamma_j})} \right)}{n \cdot (n-1)} \quad (20)$$

З використанням реальних вимірів була виконана апроксимація ряду Фур'є зміни перевищень чотирьох опор напірного трубопроводу відносно базової станції, обмежена першими його членами (мал. 2). Результати представлені в таблиці 1. Амплітуда зміни приросту координат залежить від інтенсивності кінематики кожної опори і є різною, коливається в межах від 0,8 мм до 12 мм. Відхилення

виміряних приростів координат між базовою станцією і опорами від апроксимованої кривої є проявом похибок вимірів, температурних впливів на тахеометр, зміни стійкості тахеометра, проявом миттєвих другорядних деформацій.

Таблиця 1

Коефіцієнти гармонічного ряду для опор напірного трубопроводу по координатній осі H

Номер точки	a_{Hi} , (мм)	S_{Hi} , (мм)	C_{Hi} , (мм)
1	150126	-1,00198	-1,74023
2	101695	-0,95363	-0,74226
3	28418	-0,39853	-0,22663
4	-4190	-0,04544	0,03721

Коефіцієнт a_i , є постійною величиною, залежить від величини приросту координат і надалі не використовується.

В таблиці 2 подані середні квадратичні відхилення виміру перевищень між базовою станцією та опорами напірного трубопроводу.

Таблиця 2.

Середні квадратичні відхилення виміру перевищень ∇H_i напірного трубопроводу по координатній осі H

Номер точки	∇H_i , (мм)
1	1,42
2	8,54
3	3,24
4	0,04
$\sum \nabla H_i$	2,64

В таблиці 3 представлені ненормовані та нормовані кінематичні коефіцієнти для опор напірного трубопроводу 1-4 та для точки спостереження 0.

Таблиця 3.

Ненормовані \mathfrak{K}_{Hi} та нормовані K_{Hi} кінематичні коефіцієнти по координатній осі H

Номер точки	\mathfrak{K}_{Hi}	K_{Hi}
0	0,00066	0,2
1	0,00142	0,43048
2	0,00085	0,25906
3	0,00032	0,09828
4	0,00004	0,01217
\sum	0,00330	1

В таблиці 4 подані середньовагові зміщення кожної пари точок по координатній осі H .

Таблиця 4.

Середньовагові зміщення опор напірного трубопроводу D_{Hi-j} , D_{Hi-j} по координатній осі H

Номер опори	D_{Hi-j} , мм		D_{Hi-j} , мм
0-1	-0,318	1-2	-0,124
0-2	-0,048	2-3	-0,116
0-3	0,039	3-4	-0,071
0-4	0,020		

Середньовагове зміщення по координатній осі H обчислюємо за формулою (17): $\delta\delta = -0,128$ мм. Проекцію середнього зміщення мережі визначена з результатів вимірів при умові нерухомості тахеометра, обчислюємо із виразу (18): $\Delta\Delta = -0,69$ мм. За (19) знаходимо різницю середньовагового зміщення та проекції середньовагового зміщення визначеного з класичного урівноваження $\delta\Delta_H = \Delta\Delta_H - \delta\delta_H = -0,56$ мм.

В таблиці 5 подані реальні зміщення точок по координатній осі H .

Таблиця 5.

Реальні зміщення точок δH_i по координатній осі H

Номер точки	δH_i , мм
0	0,56
1	-1,18
2	-0,18
3	0,33
4	0,51

В таблиці 5 отримані реальні зміщення точок напірного трубопроводу по координатній осі H на кінець доби. Ці значення невеликі, але вони можуть систематично накопичуватись в часі, що може приводити до руйнування фундаментів опор напірного трубопроводу. На малюнку 2 показано реальні зміщення точок на кінець доби. Отримані результати дозволяють реально оцінити короткоперіодичні деформації напірного трубопроводу.

ВИСНОВОК

В результаті роботи виконано спостереження за короткоперіодичними зміщеннями напірного трубопроводу. Розроблено математичний апарат визначення зміщень напірного трубопроводу, який використовує функцію ряду Фур'є і теорію кінематичних коефіцієнтів. За допомогою якого обчислено реальні зміщення для всіх опор напірного трубопроводу по координатній осі H . Слід зазначити, що короткоперіодичні деформації можуть призводити до руйнування споруд, зокрема, в нашому випадку напірного трубопроводу. І це несе певну небезпеку та вимагає систематичного контролю та досліджень.

Література

[1] Тербля-Ріцька ГЕС 50., ВАТ ЕК «Закарпаттяобленерго», м.Ужгород, «Вісник Карпат» 2006. – с. 58.
 [2] Третяк К.Р., Грицюк Т.Ю. Моніторинг напружень напірного трубопроводу Тербля-Ріцької ГЕС геодезичними методами // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. - 2008. – Вип. 1(15). - С. 146-156.
 [3] Третяк К.Р. Теоретичне обґрунтування методики обробки висотних кінематичних мереж. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: Ліга-прес. – 2002. – с.100-110.