середніх значень // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2007 (І випуск): Зб. наук. праць. - Л. – С. 140-145. 4. Пряха Б.Г. До оцінки похибок вимірювань у геодезичних побудовах // Вісник геодезії та картографії. – 2002. - №4. С. 11-18. 5 Пряха Б.Г. Про числові характеристики результатів вимірювань // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування – Європейський досвід. – Чернігів: ЧДІЕУ, 2008. – С. 97-108. 6. Пряха Б. Явні означення дисперсій σ^2, Σ^2 *// Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2008, випуск І(15): Зб. наук. праць – Л. – С 110-117. 7. Кузьменко И.Н., Полищук Ю.В., Шаповалова Л.А. Применение теории случайных функций в геодезии. – К.: Вища школа, 1980. – С.48.*

УДК 528.48

К. Третяк, Т. Грицюк
Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОДИКА ОПРАЦЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ МЕРЕЖ НА ПРИКЛАДІ НАПІРНОГО ТРУБОПРОВОДУ ТЕРЕБЛЄ-РІЦЬКОЇ ГЕС

© Третяк К., Грицюк Т., 2009

За результатами перманентных геодезических измерений выполненных с помощью роботизированного электронного тахеометра Leica TPS 1201 исследованы короткопериодические смещения фундаментов опор напорного трубопровода Теребле-Рикской ГЕС. Разработан алгоритм и программы вычисления и моделирования деформационных процессов трубопровода на основе теории кинематических коефициентов. Выполнены исследования зависимости точности определения смещений от их интенсивности и количества циклов наблюдений.

The short-term stresses and strains of the pressure pipeline on Tereblya-Rikska HydroPower Station had been investigated. This investigation is based on the the results of the permanent geodetic surveys using electronic tacheometer Leica TPS 1201. The algorythm and the computation programs for the modeling of the deformation processes of the pipeline had been developed and is based on the theory of kinematic coefficients. The investigations for the accuracy determination of the displacements and their intensity from the cycles of surveying had been held.

Вступ. Експлуатації ГЕС мають циклічний характер, який залежить від добового споживання електроенергії. Вдень потреби в електроенергії значно вищі, відповідно і ГЕС спрацьовує більше води, що призводить до значних навантажень на напірний трубопровід. Уночі споживання електроенергії суттєво зменшується, тож менше споживається води, менше навантаження і на трубопровід. Таким чином, технологічні зміни на трубопровід може спричинювати короткоперіодичні зміщення трубопроводу.

Нами був проведений експеримент по визначенню добових короткоперіодичних деформацій напірного трубопроводу Тереблє-Ріцької ГЕС. Тереблє-Ріцька ГЕС розташована в Карпатах, в Закарпатській області. ТРГ являється гідроелектростанцією деріваційного типу На ріці Теребля споруджено греблю довжиною 153м і висотою 45,8м. Між рікою Теребля і рікою Ріка споруджено деріваційний тунель довжиною 3,7км. Вода з водосховища по деріваційному тунелю, поступає в напірний трубопровід і на турбогенератори. Таким чином води Тереблі через Тереблє-Ріцьку ГЕС потрапляють в р.Ріка [1].

Виміри виконувались за допомогою роботизованого електронного тахеометра Leica TPS 1201 (рис.1). Цей тахеометр дає змогу проводити високоточні короткоперіодичні кутові та лінійні вимірювання з точністю $1''$. Він також підтримує геодезичну систему моніторингу, яка дозволяє в автоматичному режимі через заданий проміжок часу виконувати повторні вимірювання на

контрольні точки. Прилад обладнаний сенсором, який дає змогу автоматично знаходити відбивач і точно наводитись на нього [2].

Вимірювання тахеометром проводились зі станції «0», розташованої на даху машинного залу ТРГ, на чотири анкерних опори з відбивачами через кожні півгодини. Для кожного виміряного вектора визначалися проекції в умовній топоцентричній системі координат на осі *X, Y, H*.

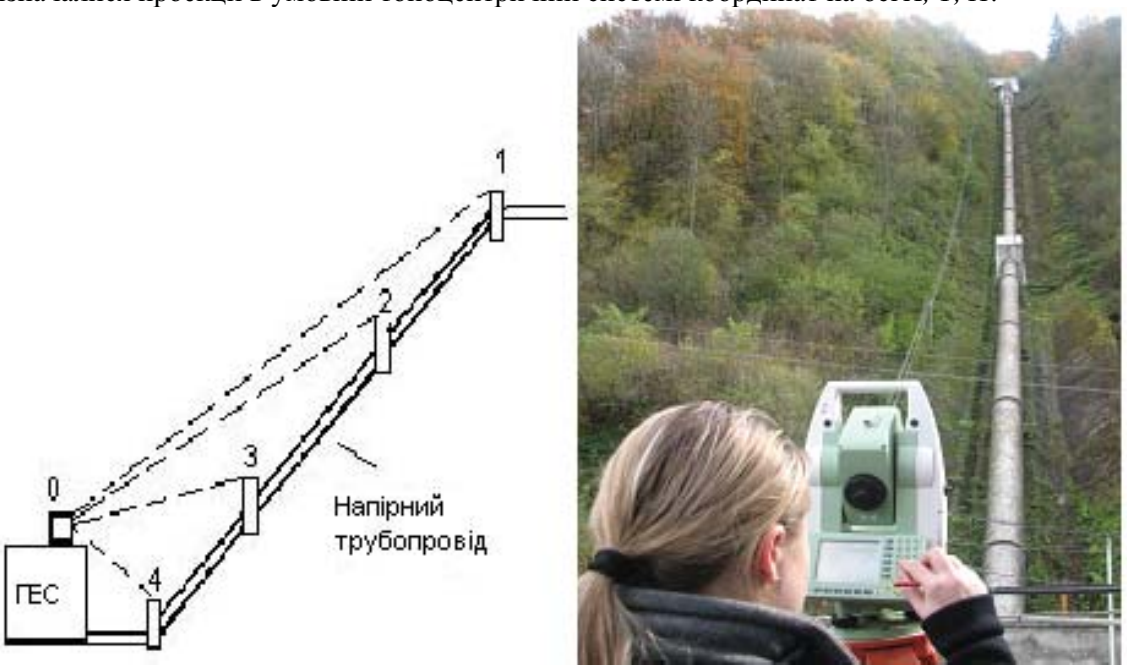

Рис.1 Спостереження за зміщеннями опор напірного трубопроводу

За результатами перманентних добових вимірів визначено прирости координат точок відносно точки «0» за 48 циклів.

Постановка проблеми. Оскільки прирости координат отримано відносно базової станції «0», яку ми приймали нерухомою, то ми отримуємо суб'єктивний результат, про реальні зміщення і деформації напірного трубопроводу. Електронний тахеометр також знаходиться на будівлі ГЕС (напірному трубопроводі), і так само він зазнає зміщень.

Виникає задача визначення реальних зміщень напірного трубопроводу, які не залежать від вибору нерухомого пункту (електронного тахеометра), і є проявом його короткоперіодичних деформацій та можуть мати небезпечний вплив на стійкість фундаменту. Для розв'язку цієї задачі скористаємося теорією кінематичних коефіцієнтів, яка теоретично обґрунтована у роботі [3]. Вона дозволяє визначати майже реальні зміщення пунктів геодезичної мережі, які не залежні від вибору системи координат; вибору вихідних пунктів (їх стійкості). Ця теорія не вимагає накладання математичних обмежень на результати вимірів. Дану методику опрацювання геодезичних вимірів, можна застосовувати, де є значний обсяг перманентних вимірів. Чим більше вимірів і чим більша частота вимірів тим достовірніший кінцевий результат. Опрацювання кожного наступного циклу спостережень вимагає розподілу поправок за результатами вимірів у координати пунктів мережі визначених у попередньому циклі. Розподіл цих поправок виконується пропорційно величині кінематичних коефіцієнтів кожного пункту, які розраховуються на підставі зміни приростів координат виміряних векторів. При цьому для розрахунку кінематичних коефіцієнтів пунктів враховуються вектори, які опираються на даний пункт.

Всі обчислення виконувались в програмному пакеті MATHCAD.

Виклад основного матеріалу. Визначення зміщень опор напірного трубопроводу проводиться на підставі виміряних приростів координат між пунктами опор. Опрацювання вимірів проводиться окремо по кожній координатній осі.

Для прикладу в таблиці 1 подані виміряні перевищення опор напірного трубопроводу з 16 по 25 цикл. Часовий інтервал між циклами спостережень складає 0,5 год.

Таблиця 1

Перевищення опор напірного трубопроводу h (м)

№ пор	Номери циклів вимірювань									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	150,1242	150,1279	150,1247	150,1251	150,1278	150,1231	150,1257	150,1281	150,1259	150,1266
	101,6941	101,6940	101,6936	101,6944	101,6954	101,6924	101,6952	101,6960	101,6961	101,6953
	28,4169	28,4172	28,4176	28,4178	28,4181	28,4166	28,4177	28,4179	28,4183	28,4180
	-4,1900	-4,1900	-4,1898	-4,1896	-4,1899	-4,1904	-4,1899	-4,1896	-4,1897	-4,1897

За виміряними перевищеннями Δh за виразом (1) знаходимо середнє квадратичне відхилення кожного перевищення від його середньої величини за весь період попередніх спостережень ∇h [3].

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

де k - порядковий номер останнього циклу спостережень, l - порядковий номер поточного циклу спостережень.

Результати визначення ∇h приведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Середнє квадратичне відхилення кожного перевищення від його середньої величини за увесь період спостережень ∇h (мм) (приведено для 48 циклу)

№№ опор	∇h
1	2,75
2	1,63
3	0,69
4	0,22

Далі за результатами обчислень ∇h, для точки «0» за виразом (2) знаходимо ненормований кінематичний коефіцієнт $\Re_0$.

$$\Re_{H_0} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\nabla h_i.}{n} \qquad (2)$$

Ненормований кінематичний коефіцієнт анкерної опори $\Re_i$ для осі H виражається як:

$$\Re_{H_i} = \nabla H_i, \qquad (3)$$

У таблиці 3 наводимо розраховані ненормовані коефіцієнти $\Re$.

Таблиця 3

Значення ненормованих кінематичних коефіцієнтів $\Re$

№№ опор	Номери циклів вимірювань									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	0,00142	0,00141	0,00137	0,00134	0,00134	0,00134	0,00131	0,00133	0,00131	0,00130
1	0,00273	0,00278	0,00270	0,00264	0,00266	0,00262	0,00257	0,00261	0,00257	0,00254
2	0,00209	0,00202	0,00197	0,00192	0,00184	0,00189	0,00186	0,00186	0,00186	0,00183
3	0,00063	0,00061	0,00059	0,00058	0,00058	0,00060	0,00059	0,00058	0,00059	0,00059
4	0,00023	0,00023	0,00022	0,00022	0,00022	0,00025	0,00024	0,00024	0,00024	0,00023

Далі за виразом (4) визначаємо нормовані коефіцієнти кінематики K для точок *0-і:*

$$K_{Hi} = \frac{\Re_{H_i}}{\sum_{i=1}^{n} \Re_{H_n}} \tag{4}$$

Таблиця 4

Значення нормованих кінематичних коефіцієнтів K

№№ опор	Номери циклів вимірювань									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1	0,386	0,394	0,394	0,393	0,398	0,392	0,391	0,395	0,391	0,391
2	0,294	0,287	0,287	0,287	0,283	0,282	0,283	0,281	0,283	0,282
3	0,088	0,087	0,087	0,087	0,087	0,09	0,09	0,088	0,09	0,09
4	0,032	0,032	0,032	0,033	0,032	0,037	0,037	0,036	0,036	0,036

Далі за формулою (5) визначаємо середньовагові зміщення $D_{H_{i,j}}$ для кожної пари точок i, j.

$$D_{Hi,j} = \frac{\left(K_{H\,i} - K_{H\,j}\right)\delta_{Hi,j}}{2\left(K_{Hi} + K_{H\,j}\right)} \tag{5}$$

Результати обчислення $Dh_{i,j}$ для останнього циклу спостережень приведено у таблиці 5.

Таблиця 5

Середньовагове зміщення кожної пари точок $D_{H_{i,j}}$ (мм)

№№ опор	1	2	3	4
1	0,395	0,034	-0,0605	0,120
2		0,205	0,562	1,103
3			0,0549	0,377
4				0,185

За формулою (6) знаходимо середньовагові зміщення $D_{H_{i,0}}$ для кожної пари точок $i, 0$.

$$D_{Hi,0} = \frac{\left(K_{H\,i} - K_{H\,0}\right)\delta_{Hi,0}}{2\left(K_{Hi} + K_{H\,0}\right)} \tag{6}$$

Результати обчислення $D_{H_{i,0}}$ для останнього циклу спостережень приведено у таблиці 6.

Таблиця 6

Середньовагове зміщення кожної пари точок $D_{H_{i,0}}$ (мм)

№№ опор	1	2	3	4
1	-0,731	-0,292	-0,252	0,288
2		1,006	1,498	2,398
3			0,189	0,871
4				0,544

За виразами (7), (8) визначаємо середньовагове зміщення всієї мережі $\delta\delta$ та зміщення за результатами вимірів.

$$\delta\delta_H = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_{H_{i,0}}}{n} + \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} D_{H_{i,j}}}{n\left(n-1\right)} \tag{7}$$

$$\Delta\Delta_H = \frac{\sum_{i=1}^{n} \delta_H}{n} \tag{8}$$

Далі знаходимо різниці між середнім зміщенням мережі по відповідній осі координат і визначеним із результатів вимірів:

$$\delta\Delta_H = \Delta\Delta_H - \delta\delta_H \qquad (9)$$

Результати обчислень $\delta\delta_H$, $\Delta\Delta_H$ з 15 по 25 цикл спостережень приводимо у таблиці 7.

Таблиця 7

Результати визначення $\delta\delta_H$, $\Delta\Delta_H$ (мм)

№№ опор	Номери циклів вимірювань									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\Delta\Delta_H$	0,187	0,761	-0,584	0,352	0,702	-1,94	1,41	0,746	-0,348	-0,087
$\delta\delta_H$	0,161	0,361	-0,392	0,044	0,350	-0,502	0,306	0,234	-0,222	0,032

В таблиці 8 приведені значення остаточних зміщень точок $\delta\Delta_H$ з 15 по 25 цикл спостережень

Таблиця 8

Результати визначення $\delta\Delta_H$ (мм)

Номери циклів вимірювань	$\delta\Delta_H$
16	0,025
17	0,400
18	-0,193
19	0,308
20	0,352
21	-1,44
22	1,10
23	0,512
24	-0,126
25	-0,119

По даній методиці обчислюємо перевищення всіх точок для всіх циклів спостережень, відносно точки спостереження. Результати визначення перевищень для всіх циклів спостережень приведено в таблиці 9.

Таблиця 9

Отримані зміщення точок δH_i по координатній осі H (м)

№№ опори	Номери циклів вимірювань									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	0.0001	0.0004	-0.0002	0.0003	0.0004	-0.0014	0.0011	0.0005	-0.0001	-0.0001
1	150.1243	50.1283	150.1245	150.1254	150.1281	150.1216	150.1268	150.1286	50.1258	150.1264
2	101.6941	01.6944	101.6934	101.6948	101.6957	101.6909	101.6963	101.6965	01.6960	101.6952
3	28.4169	28.4176	28.4174	28.4181	28.4184	28.4152	28.4188	28.4184	28.4182	28.4179
4	-4.1900	-4.1896	-4.1900	-4.1893	-4.1895	-4.1918	-4.1888	-4.1891	-4.1898	-4.1898

За результатами опрацювання результатів вимірів на рисунку 2 представлені графіки змін висот точок та їх визначені зміщення.

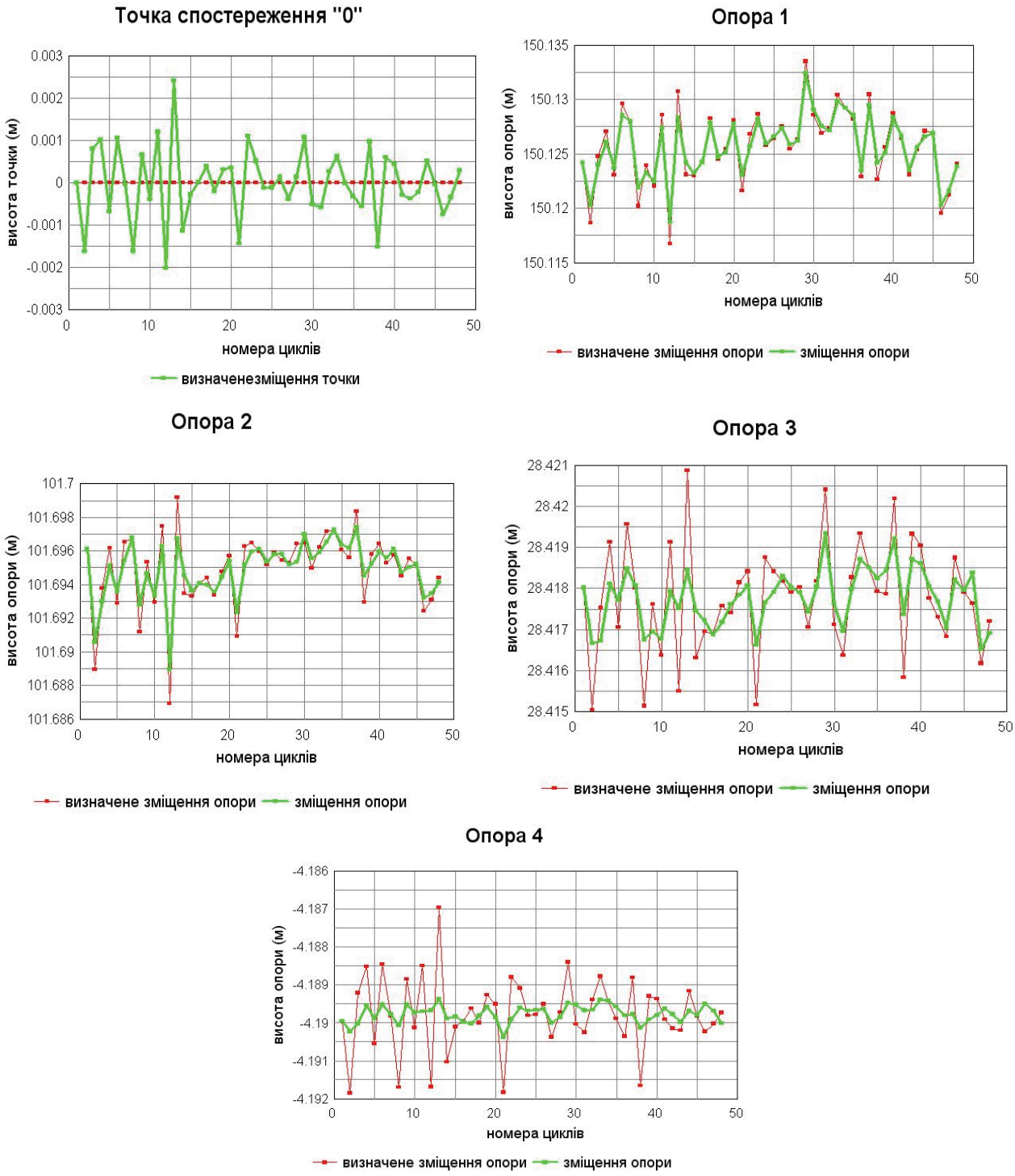

Рис.2 Графіки зміни висот точок та їх реальні зміщення

Ці значення невеликі, але вони з часом накопичуються, що може спричинити руйнування фундаментів опор трубопроводу. Як, наприклад, було виявлено значне активне руйнування верхньої частини бетонної підпірної стінки будівлі дросельного затвору та зрівноважувальної шахти при візуальному обстеженні в 2001 році. Утворені пустоти досягали у діаметрі і по глибині до 1 м (див. рис.3, 4).

Рис.3. Результати руйнування підпірної стінки дросельного затвору.

Рис.4. Утворені пустоти в тілі підпірної стінки.

Оцінку точності ми виконуємо наступним чином. Спочатку, за виразом (10) ми обчислюємо середню квадратичну кінематичну похибку визначення висоти точки:

$$m_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\delta H_i - \Delta H_i\right)^2}{n-1}} \qquad (10)$$

Таблиця 10

Середня квадратична кінематична похибка визначення висоти точки, (мм)

№№ опори	Номери циклів вимірювань									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0	0.24	0.88	0.64	0.54	0.76	2.54	1.94	0.93	0.43	0.29
1	0.34	1.57	1.21	0.44	1.21	2.96	1.96	1.29	0.83	0.08
2	0.23	0.36	0.38	0.70	0.77	2.79	2.37	0.87	0.06	0.47
3	0.21	0.61	0.09	0.46	0.50	2.39	1.79	0.67	0.13	0.3
4	0.11	0.37	0.01	0.52	0.11	1.89	1.52	0.77	0.19	0.10

Як видно з таблиці середня квадратична похибка визначення висоти точки, викликана похибками вимірів у циклах спостережень, в середньому є сталою та має невеликі коливання.

Далі обчислюємо сумарну середню квадратичну похибку висот точок, викликану відхиленням кінематичної моделі від істинної:

$$M = \sqrt{\sum_{k=2}^{n} \left(m_i^{\,k} \right)^2} \tag{11}$$

На рисунку 5 зображені сумарні середні квадратичні похибки висот точок, викликані відхиленням кінематичної моделі від істинної

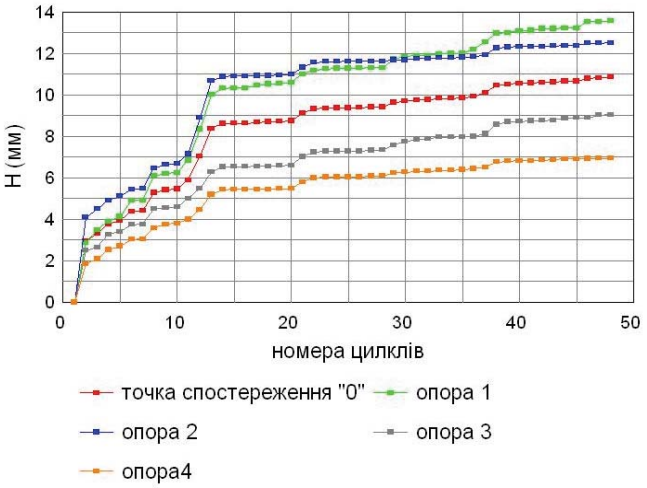

Рис. 5 Сумарна середня квадратична похибка висот точок, викликана відхиленням кінематичної моделі від істинної

З рисунку видно, що сумарна середня квадратична похибка визначення висот точок, викликана відхиленням кінематичної моделі від істинної і зростає з кількістю циклів спостережень.. У даному випадку, починаючи з 15 циклу вона зростає більш повільно ніж у перших циклах.

Це пов'язано з тим, що приблизно до 15 циклу уточнюються значення коефіцієнтів кінематики. Після 15 циклу коефіцієнти кінематики набувають більш-менш сталі значення, які достовірно відтворюють кінематику фундаментів трубопроводу. На підставі цього необхідно насамперед провести певну кількість циклів спостережень, які дозволять визначити стійкі значення коефіцієнтів кінематики. Тоді наступні цикли спостережень дозволяють достовірно оцінити зміщення фундаментів трубопроводу. Необхідна кількість циклів залежить від інтенсивності зміщень напірного трубопроводу та їх прискорень. Тому, в кожному окремому випадку, необхідно дослідити необхідну кількість початкових циклів замірів, а після встановлення стійких значень коефіцієнтів кінематики, проводити моніторинг трубопроводу. Необхідно зазначити, що дана методика дозволяє визначити періодичні середні $\delta\delta$ та для кожної опори $\delta\Delta$ зміщення фундаментів напірного трубопроводу , які виникають у наслідок добового технологічного циклу його експлуатації і приводять до повільного руйнування фундаментів.

Висновки. В результаті роботи обчислено остаточні зміщення анкерних опор напірного трубопроводу, які є наслідком деформацій трубопроводу та можуть приводити до руйнування його фундаменту. Розроблено алгоритм та програми моделювання деформаційних процесів трубопроводу. Дана методика дозволяє визначити періодичні середні $\delta\delta$ та для кожної опори $\delta\Delta$ зміщення фундаментів напірного трубопроводу , які виникають у наслідок добового технологічного циклу його експлуатації і приводять до повільного руйнування фундаментів.

Ці дослідження відкривають можливість оптимізації технічного циклу та прогнозування деформаційних процесів напірних трубопроводів ГЕС та ГАЕС. Рекомендується застосовувати даний метод для геодезичного моніторингу інших інженерних конструкцій.

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