

ГЕОДЕЗІЯ

УДК 528.48

К. Р. ТРЕТЯК¹, С. Л. ПЕТРОВ^{2*}, Ю. І. ГОЛУБІНКА³, Ф. К. Ф. АЛЬ-АЛУСІ¹

¹ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013

² Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38(032)2582387, ел. пошта petrovsl06@gmail.com

³ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ ПУНКТИВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД КАНІВСЬКОЇ ГЕС

Мета. У межах проекту відновлення гідроелектростанцій на Канівській ГЕС фахівці компанії Leica Geosystems спільно з Укргідроенерго створили систему автоматизованого геодезичного моніторингу, до складу якої входять: роботизовані електронні тахеометри, ГНСС-приймачі, інклінометри, працюючі синхронно, і передавальні результати спостережень у єдиний центр обробки даних. Основна ідея системи моніторингу полягає в інтеграції різних компонентів геодезичних вимірювань для досягнення максимальної точності і надійності результатів. З березня 2014 р. система моніторингу почала надсилати результати добових ГНСС-спостережень на Канівській ГЕС. За березень отримані добові файли спостережень 77 векторів мережі. **Методика.** Для проведення обробки результатів вимірювань, отриманих системою автоматизованого геодезичного моніторингу, в програмному пакеті Leica GeoMoS необхідно знати найстабільніші пункти мережі. Тобто необхідно визначити просторові положення пунктів на епоху відповідного циклу спостережень з урахуванням зміщення всіх пунктів мережі, і вибрати найбільш стабільні пункти. Для цього, використовуючи величини проєкцій вимірюваних векторів на відповідні координатні осі Δx , Δy , Δz , для кожного повторного циклу спостережень виконано врівноваження параметричним методом. За цими даними знайдено середні квадратичні відхилення проєкції вектора між всіма пунктами від його середньої величини. Також обчислено ненормовані і нормовані кінематичні коефіцієнти для кожного пункту, величини яких свідчать про їхню стабільність. За величинами середньовагових зсувів по осях координат кожної пари пунктів з урахуванням кінематичних коефіцієнтів знайдено середньоваговий зсув усієї мережі, викликаний її деформацією, зміщення середньої висоти мережі за результатами врівноваження і кінцеві зміщення пунктів, викликані деформацією мережі. За результатами врівноваження кожного циклу отримані середні квадратичні похибки (СКП) визначення координат з урахуванням похибок вимірювань і похибок моделювання кінематики пунктів. Отримані результати використані для визначення найстабільніших пунктів мережі. **Результати.** Отримані загальні зміщення пунктів відносно першого циклу спостережень та середньоквадратичні похибки просторового положення пунктів з урахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі. **Практична значущість.** Запропонована методика визначення СПП мережі, що викликано її деформацією та похибками вимірів, дає змогу проводити аналіз стійкості пунктів з урахуванням кінематики кожного пункту, а також вибирати найстабільніші пункти мережі. Застосування цієї методики дає змогу використовувати програмне забезпечення Leica GeoMoS для опрацювання результатів, одержаних системою автоматизованого геодезичного моніторингу ГЕС.

Ключові слова: система автоматизованого геодезичного моніторингу; результати добових ГНСС-спостережень; кінематика мережі; зміщення пунктів викликані деформацією мережі; стабільність пунктів мережі; прогнозування кінематики опорних просторових мереж.

Вступ

Спостереження за осіданнями і деформаціями об'єктів енергетичного комплексу, а саме гідроелектростанцій (ГЕС) є важливими в

сучасній практиці інженерно-геодезичних робіт [Acton J. M. 2012]. Нині традиційні методи геодезичних вимірювань для визначення деформацій інженерних споруд замінюють но-

вими технологіями, які істотно скорочують час вимірювань та дають змогу автоматизувати спостереження [Ашраф, А., 2010, Ehigiator I., 2012]. До нових технологій спостережень за деформаціями належать також технології із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

Саме таку технологію для спостережень застосовано на трьох гідроелектростанціях України (Канівська ГЕС, Дністровська ГЕС, Дніпровська ГЕС та Дніпродзержинська ГЕС) спеціалістами компанії Leica Geosystems спільно з Укргідроенерго в межах проекту відновлення гідроелектростанцій. Для цього на кожній з станцій встановлено систему автоматизованого геодезичного моніторингу, до складу якої входять: роботизовані електронні тахеометри Leica TM30 ($m_p=0,5$), інклінометри Leica Nivel 200, ГНСС-приймачі з антенами Leica AR10, які працюють синхронно та передають результати спостережень у єдиний центр опрацювання даних. Центр виконує функції опрацювання вимірів та аналізу результатів

(координат контрольних точок на конструкціях ГЕС) на предмет виявлення просторових зміщень контрольних точок.

Координати контрольних точок та їх просторові зміщення визначені в єдиній світовій системі координат ITRS. Для цього координати опорних пунктів кожної з станцій (пункти, де встановлені ГНСС-приймачі та електронні тахеометри) визначені від 11 перманентних ГНСС-станцій мережі EPN: ANKR, BUCU, CRAO, GLSV, JOZE, KHAR, PENC, POLV, SULP, UZHL, ZECK (рис. 1).

Крім ГНСС-спостережень створено мережу GPS-моніторингу (роботизовані електронні тахеометри та відбивачі) для цілодобової системи автоматичного моніторингу у важкодоступних місцях греблі станцій. Основна ідея систем моніторингу полягає в інтеграції різних компонентів геодезичних вимірювань для досягнення максимальної точності та надійності результатів.

Загалом структуру системи автоматизованого геодезичного моніторингу подано в табл. 1.

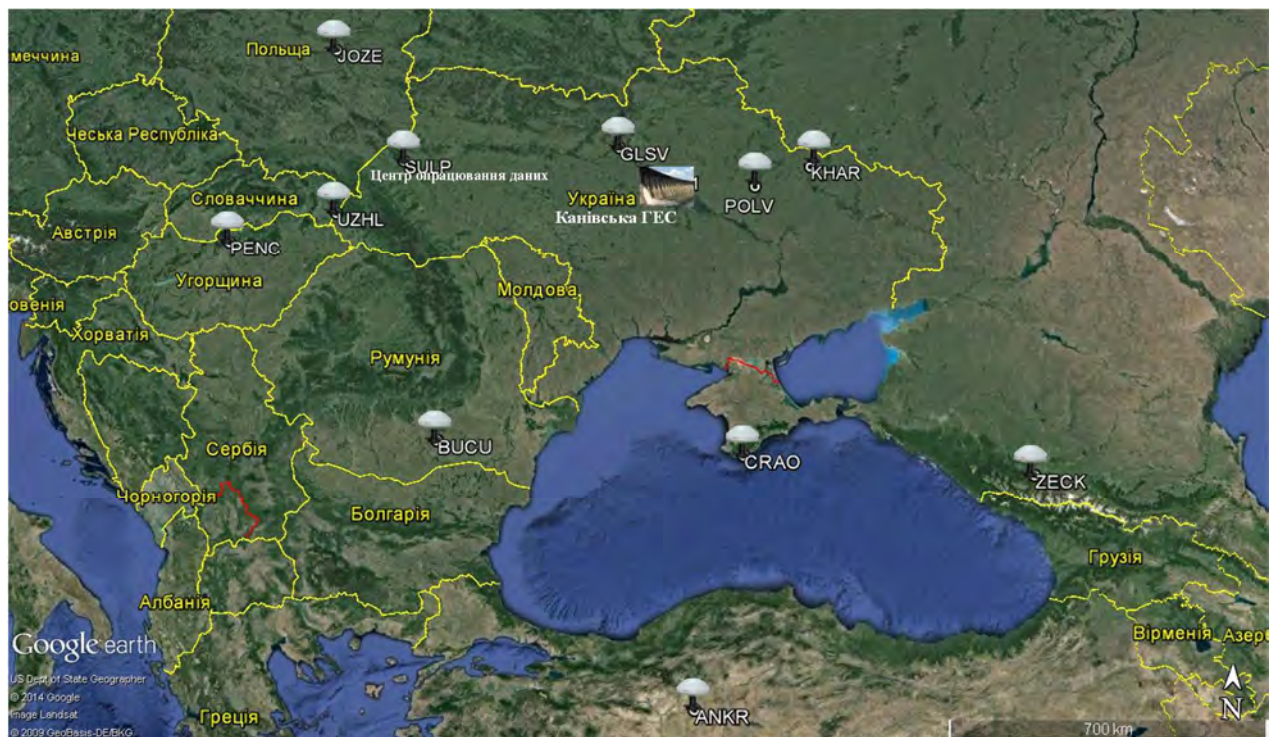


Рис. 1. Схема розташування перманентних ГНСС-станцій, опорних пунктів систем моніторингу Канівської ГЕС та центру опрацювання даних (Національний університет "Львівська політехніка")

Fig. 1. The scheme of placement of permanent GNSS stations, reference points of Kaniv HPP monitoring system and data processing center Lviv polytechnic National university

Таблиця 1

Структура системи автоматизованого геодезичного моніторингу
The structure of automatic geodetic monitoring

Рівень	Відповідальний	Об'єкт моніторингу	Тип вимірів	Програмне забезпечення
<i>Регіональний</i>	<i>Укргідроенерго</i>	мережа перманентних станцій	ГНСС-спостереження	Bernese GNSS
		опорна мережа Канівської ГЕС	ГНСС-спостереження	Bernese GNSS
		опорна мережа Дністровської ГЕС-1	ГНСС-спостереження	Bernese GNSS
		опорна мережа Дніпровської ГЕС	ГНСС-спостереження	Bernese GNSS
		опорна мережа Дніпродзержинської ГЕС	ГНСС-спостереження	Bernese GNSS
<i>Локальний</i>	<i>Дирекції станцій</i>	опорна мережа однієї з станцій	ГНСС-спостереження	Bernese GNSS
		мережа контрольних точок	ГНСС-спостереження, TPS моніторинг	Leica GNSS Spider Leica GeoMoS

Для опрацювання результатів вимірів, одержаних системою автоматизованого геодезичного моніторингу, в програмному пакеті Leica GeoMoS необхідно знати найстабільніші пункти мережі. Для цього використовують програмне забезпечення Bernese [www.bernese.unibe.ch], яке визначає взаємне положення пунктів мережі.

Стабільність опорних пунктів на кожній з ГЕС визначається відносно перманентних станцій, які розташовані на відстані від 200 до 700 км, за відстані між самими опорними пунктами 500–800 метрів. У разі врівноваження мережі такої конфігурації є проблематичним одержання однозначно правдивої інформації про стабільність опорних пунктів. Тому, на нашу думку, доцільніше розглядати питання стабільності опорної мережі та мережі контрольних точок окремо на кожному об'єкті.

Опорну мережу та мережу контрольних точок станції можна зарахувати до кінематичних просторових мереж. Основною проблемою опрацювання таких мереж є визначення істинного просторового положення пунктів на епоху відповідного циклу спостережень із урахуванням зміщення всіх пунктів мережі та подальший вибір вихідних пунктів.

Сьогодні існує багато методів визначення стійкості пунктів. Але в разі застосування цих

методів до тієї самої мережі нерідко одержують різні результати стабільності положення пунктів. Крім того, запропоновані методи не завжди можна використати для якоїсь конкретної мережі [Калинченко І. С., 2014, Aksamitauskas VČ, 2010]. У сучасних наукових виданнях велику увагу звертають на проблеми визначення стабільності реперів висотних кінематичних мереж. Відмінність визначення стабільності пунктів просторових мереж полягає у знаходженні відповідних значень для трьох координат X, Y та Z. Методи визначення стабільності положення пунктів кінематичних мереж для спостереження за деформаціями та зміщеннями розглянуто у підручниках, монографіях [Баран П. І., 2012, Марфенко С. В., 2004, Кузнецов О. Ф. 2010, Шеховцов Г. А., 2009], а також у статтях та дисертаційних роботах [Волков В. І., 2012, Третяк К. Р., 2004].

Їх можна поділити на дві групи: статичні мережі та змінні в часі. Методи зі статичною поверхнею відносності поділяють на дві групи [Ганьшин В. Н., 1991], в основу яких покладено такі принципи: незмінність положення найстійкішого пункту та незмінність середнього положення усіх пунктів мережі або групи найстійкіших пунктів. Аналізуючи ці методи, можна зробити такі висновки. Метод

А. Д. Соловійова мало наочний і розрахований не більше ніж на три вихідні пункти, що дуже рідко трапляється на практиці. Метод А. Костехеля під час використання сучасних комп'ютерних програм простий і зручний. Але нерідко в різних циклах спостережень вихідними є різні пункти, що ускладнює аналіз осідань цим методом. У методі Г. К. Ботяна приймають, що величини зміщень пунктів завідомо від'ємні, але в умовах промислових об'єктів пункти зазнають не тільки осідання, але і підйому. Метод І. В. Рунова має ті самі недоліки, що й метод А. Костехеля. В методах В. Ф. Чернікова, Б. Готца, В. В. Попова, П. Марчака, застосовується принцип незмінності середнього положення всіх пунктів мережі або групи найстійкіших пунктів, але середнє положення спотворюється величинами зміщень пунктів, які не є стабільними.

Методи з рухомою у часі поверхнею відносності отримали назви університетів, у яких їх розробили (Гановерський, Карлсруе, Мюнхенський, Дармштадт). Описи цих методів свідчать про застосування складних математичних процедур апроксимації просторового розподілу вертикальних зміщень, статистичного аналізу та фільтрування вимірів, застосування геологічної інформації про стійкість пунктів. У [Kersting N., 1987] перевірка цих методів на моделях виявила їх невисоку ефективність за відсутності наближеної апріорної інформації про кінематику мережі.

Основна розбіжність розглянутих методів полягає у визначенні зміни середнього просторового положення мережі (СПП) між циклами спостережень. Воно виникає в результаті сумарного просторового зміщення усіх пунктів мережі.

Мета

З березня 2014 року система моніторингу почала надсилати результати добових ГНСС-спостережень на Канівській ГЕС. Унікальність створеної мережі та використання високоточних геодезичних приладів для проведення вимірів

потребує ретельного підходу до аналізу стабільності пунктів опорної мережі та мережі контрольних точок. Тому необхідно визначити істинні просторові положення пунктів та вибрати найстабільніші пункти мережі.

Канівська ГЕС розташована на Дніпрі і є другою сходинкою Дніпровського каскаду ГЕС. Основними особливостями Канівської ГЕС є встановлення на ній горизонтальних капсульних гідроагрегатів і суміщення споруди ГЕС з водоскидними спорудами, що дало змогу відмовитись від спорудження водозливної греблі.

Створена мережа ГНСС-спостережень складається з (рис. 2):

- двох опорних пунктів (R1G і R2G), на яких розташовані роботизовані тахеометри Leica TM30 та ГНСС-приймачі з антенами Leica AR10;
- шести точок (monitoring points MP1–MP6), на яких розташовані ГНСС-приймачі з антенами Leica AR10;
- чотирьох точок (Pass point PP1–PP4), на яких розташовані ГНСС-приймачі з антенами Leica AR10, а також кругові відбивачі;
- дві активні контрольні точки (Active control points ACP1–ACP2), на яких розташовані ГНСС-приймачі з антенами Leica AR10, а також кругові відбивачі.

Опорний пункт (рис. 3) складається з армованого бетонного стовпа розміром 0,4×0,4×4,0 м для встановлення електронного тахеометра (висота пункту становить 3 м, глибина закладання 1 м), металеві віхи для кріплення ГНСС-антени висотою 4,0 м, захищеної невеликої камери для встановлення шафи з обладнанням. Все це розташовано на фундаменті, який має розміри 1,6×1,6×0,1 метри.

Точки (monitoring points MP1–MP6) розташовані у секціях греблі між підкрановими шляхами (верхній б'єф). Це металеві труби заввишки 2,0 м та діаметром 0,1 м (рис. 4). Трубу монтують на бетонний фундамент, який розташовано в тілі греблі. У верхній частині труби розміщено адаптер для встановлення антени ГНСС-приймача.

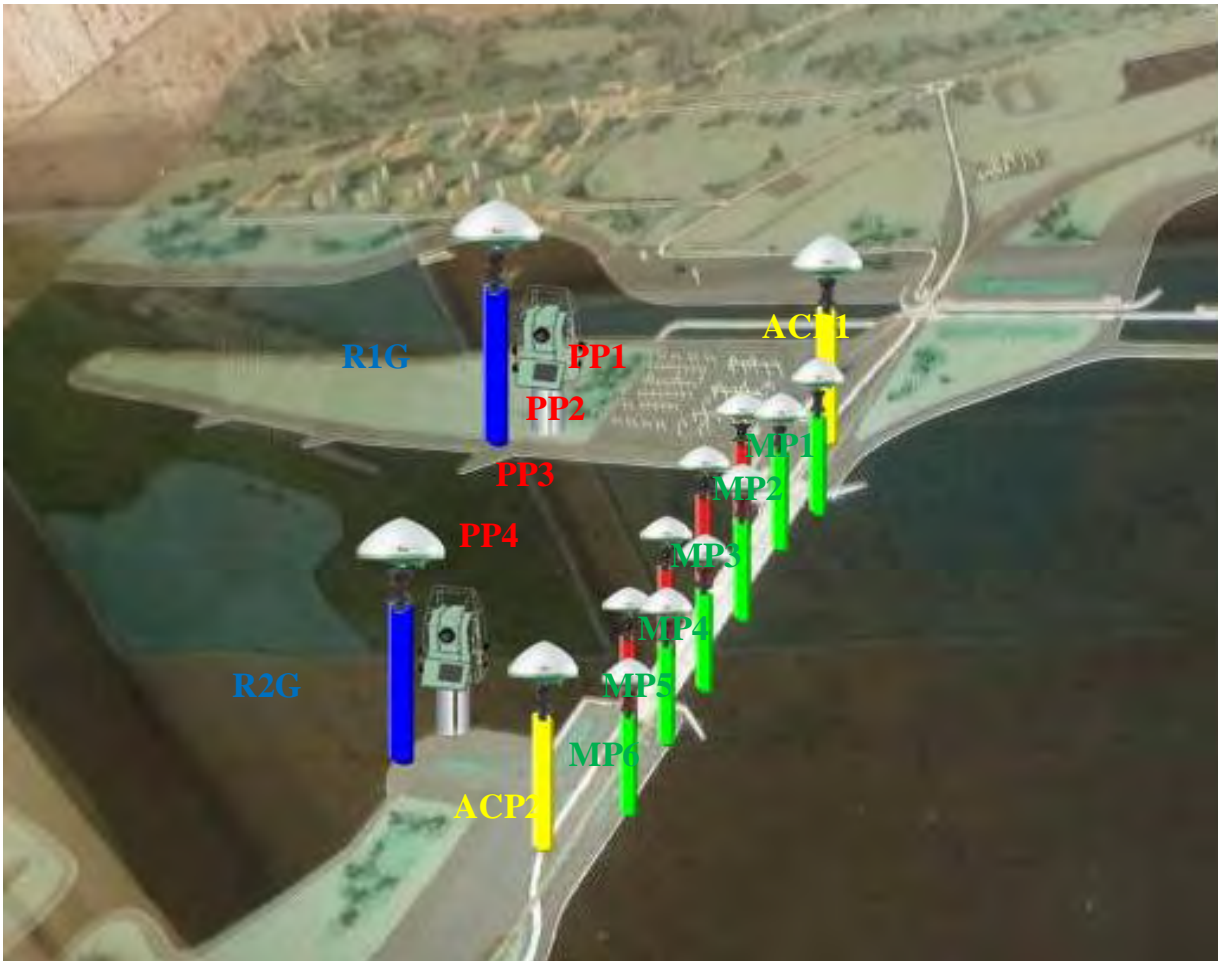


Рис. 2. Схема мережі на території Канівської ГЕС
 Fig. 2. The scheme of Kaniv HPP network



Рис. 3. Опорний пункт (R1G і R2G)
 Fig. 3. Reference point R1G and R2G



Рис. 4. Точка (MP1-MP6, PP1-PP4, ACP1-ACP2)
 Fig. 4. Monitoring point (MP1-MP6, PP1-PP4, ACP1-ACP2)

Точки (pass point PP1-PP4) розташовані на секціях греблі (нижній б'єф). Вони представляють собою металеві труби заввишки 2,0 метри та діаметром 0,1 метр (рис. 4). Трубу монтують на бетонний фундамент, який розташовано в тілі греблі. У верхній частині труби розміщено адаптер для встановлення антени ГНСС приймача та кругового відбивача.

Точки (Active control points ACP1-ACP2) розташовані за межами греблі (нижній б'єф). Це металеві труби заввишки 2,0 м та діаметром 0,1 м (рис. 4). Трубу монтують на бетонний фундамент, який розташовано в тілі греблі. У верхній частині труби розміщено адаптер для встановлення антени ГНСС-приймача та кругового відбивача.

Методика

За березень 2014 року одержані добові файли спостережень 77 векторів мережі, яка містить усі пункти, крім пункту MP5 (рис. 5). Відсутність вимірів на цьому пункті пов'язано з наявністю постійної перешкоди для прийому сигналу (рис. 11). Найменший вектор мережі

дорівнює 43 м, а найбільший – 730 метра. Всього для опрацювання використано 29 добових файлів (циклів спостережень). Довжини векторів між циклами спостережень змінюються в межах від 1,5 мм (вектор R2G – PP2), до 15 мм (R1G – MP3). Динаміку зміни довжин цих векторів наведено на рис. 6.

Оскільки вихідною інформацією для побудови просторових кінематичних моделей є проекції вимірних векторів на відповідні координатні осі Δx , Δy , Δz , то за цими даними можливе визначення значень СПП, викликане деформацією мережі за методикою проф. К. Р. Третьяка [Третьяк К. Р., 2004]. Реалізують методику послідовно для кожного повторного циклу спостережень. Опрацьовують перший цикл спостережень класичним параметричним методом зрівноваження. За результатами наступного циклу вимірювання Δx , Δy , Δz знову виконують зрівноваження параметричним методом. За результатами зрівноваження мережі параметричним способом визначають зміщення просторового положення пунктів мережі відносно попереднього циклу спостережень.

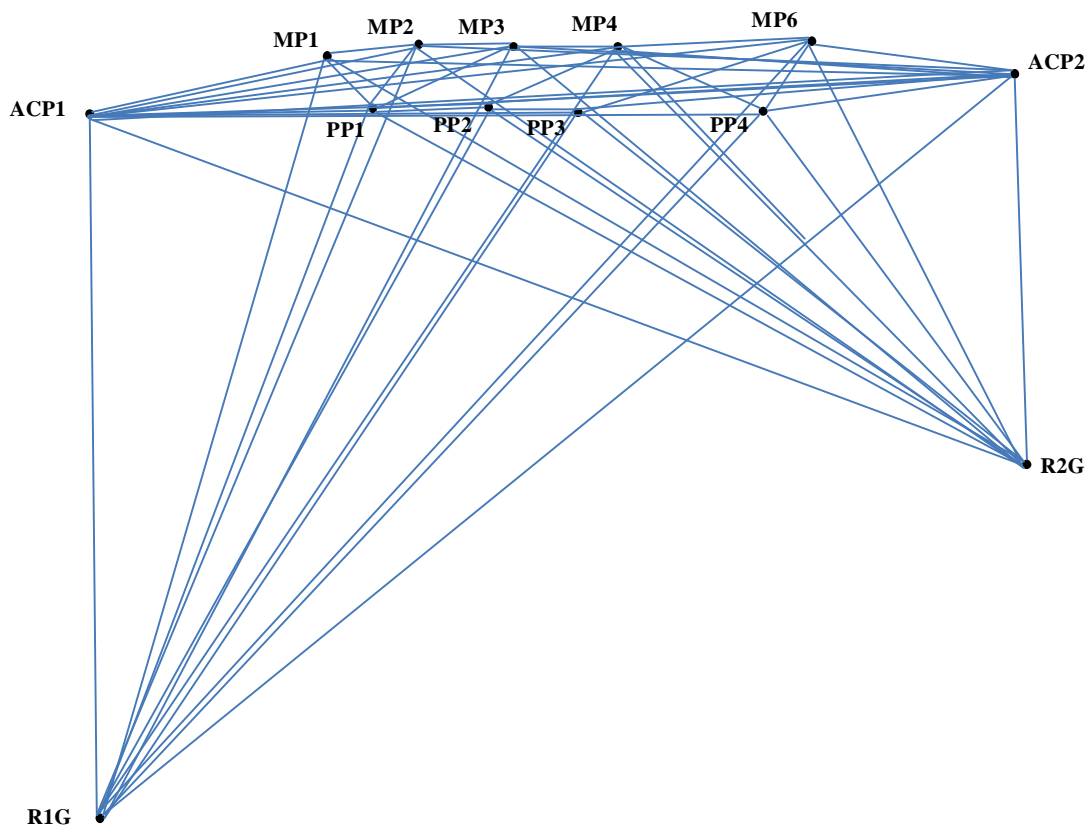


Рис. 5. Схема мережі ГНСС-спостережень на Канівській ГЕС

Fig. 5. The scheme of GNSS observations in Kaniv HPP

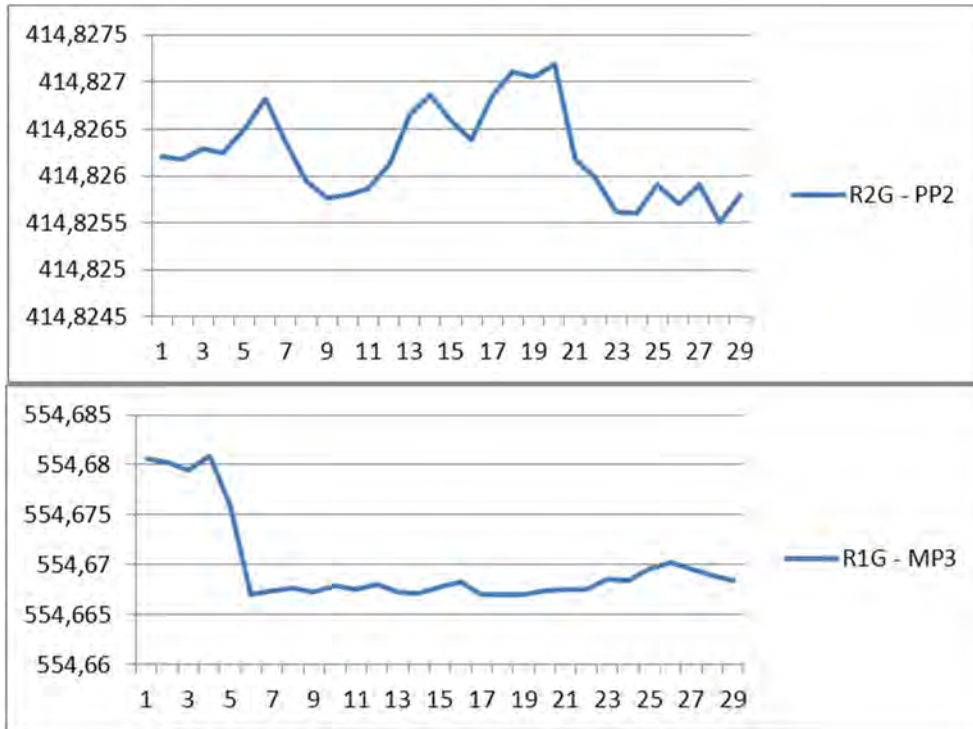


Рис. 6. Динаміка зміни довжин векторів з найбільшою (вектор R1G – MP3) та найменшою (вектор R2G – PP2) різницею (м)
 Fig. 6. Dynamics of baselines changes with maximum (R1G – MP3) and minimum (R2G – PP2) difference

Усі подальші обчислення виконуються окремо для кожного циклу спостережень. За вимірними у попередніх циклах проєкцій векторів Δx , Δy , Δz знаходять середнє квадратичне відхилення кожної проєкції вектора між пунктами r та t від його середньої величини за весь або певний період попередніх спостережень $\nabla x_{r,t}^k, \nabla y_{r,t}^k, \nabla z_{r,t}^k$

$$\begin{aligned} \nabla x_{r,t}^k &= \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left(\Delta x_{r,t}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \Delta x_{r,t}^l}{k} \right)^2}{k}}; \\ \nabla y_{r,t}^k &= \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left(\Delta y_{r,t}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \Delta y_{r,t}^l}{k} \right)^2}{k}}; \\ \nabla z_{r,t}^k &= \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^k \left(\Delta z_{r,t}^l - \frac{\sum_{l=1}^k \Delta z_{r,t}^l}{k} \right)^2}{k}}, \end{aligned} \quad (1)$$

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

Далі за результатами обчислень $\nabla x_{r,t}^k, \nabla y_{r,t}^k, \nabla z_{r,t}^k$ для кожного пункту знаходять ненормовані кінематичні коефіцієнти Rx_r, Ry_r, Rz_r

$$\begin{aligned} Rx_r &= \frac{\sum_{t=1}^n \nabla x_{r,t} h_{r,t}}{t \neq r}; \\ Ry_r &= \frac{\sum_{t=1}^n \nabla y_{r,t} h_{r,t}}{t \neq r}; \\ Rz_r &= \frac{\sum_{t=1}^n \nabla z_{r,t} h_{r,t}}{t \neq r}. \end{aligned} \quad (2)$$

Наступним кроком є знаходження для всіх пунктів значень нормованих кінематичних коефіцієнтів Kx_r, Ky_r, Kz_r

$$Kx_r = \frac{Rx_r}{\sum_{t=1}^n R_t}, Ky_r = \frac{Ry_r}{\sum_{t=1}^n R_t}, Kz_r = \frac{Rz_r}{\sum_{t=1}^n R_t}. \quad (3)$$

Далі розраховуються середньовагові зміщення по осях координат X, Y та Z кожної пари пунктів із урахуванням кінематичних коефіцієнтів

$$\begin{aligned} Dx_{i,j} &= \frac{(K_j - K_i) \delta x_{ij}}{2(K_j + K_i)}; \\ Dy_{i,j} &= \frac{(K_j - K_i) \delta y_{ij}}{2(K_j + K_i)}; \\ Dz_{i,j} &= \frac{(K_j - K_i) \delta z_{ij}}{2(K_j + K_i)}, \end{aligned} \quad (4)$$

де δx_{ij} , δy_{ij} , δz_{ij} – зміна на відповідні координатні осі довжини проекції вектора між сусідніми циклами спостережень.

Визначаємо середньовагове зміщення всієї мережі по осях координат X , Y та Z викликане її деформацією

$$\begin{aligned}\delta\delta_x &= \frac{2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D x_{i,j}}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i}{n}; \\ \delta\delta_y &= \frac{2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D y_{i,j}}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i}{n}; \\ \delta\delta_z &= \frac{2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n D z_{i,j}}{n(n-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i}{n}\end{aligned}\quad (5)$$

та зміщення середньої висоти мережі за результатами зрівноваження $\Delta\Delta_x$, $\Delta\Delta_y$, $\Delta\Delta_z$

$$\begin{aligned}\Delta\Delta_x &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^{yp}}{n}; \\ \Delta\Delta_y &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^{yp}}{n}; \\ \Delta\Delta_z &= \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^{yp}}{n}.\end{aligned}\quad (6)$$

Також визначаємо кінематичне зміщення мережі відносно результатів зрівноваження

$$\begin{aligned}\delta\Delta_x &= \Delta\Delta_x - \delta\delta_x; \\ \delta\Delta_y &= \Delta\Delta_y - \delta\delta_y; \\ \delta\Delta_z &= \Delta\Delta_z - \delta\delta_z\end{aligned}\quad (7)$$

та кінцеві зміщення пунктів викликані деформацією мережі

$$\begin{aligned}\delta X_i &= \Delta X_i^{yp} - \delta\Delta_x; \\ \delta Y_i &= \Delta Y_i^{yp} - \delta\Delta_y; \\ \delta Z_i &= \Delta Z_i^{yp} - \delta\Delta_z.\end{aligned}\quad (8)$$

Остаточні координати пунктів у циклі спостережень знаходять за формулою

$$\begin{aligned}X_i^j &= X_i^{l-1} + \delta X_i; \\ Y_i^j &= Y_i^{l-1} + \delta Y_i; \\ Z_i^j &= Z_i^{l-1} + \delta Z_i.\end{aligned}\quad (9)$$

Оцінку точності результатів опрацювання спостережень виконуємо так. Спочатку за результатами зрівноваження кожного циклу отримуємо середні квадратичні похибки (СКП) визначення координат відносно жорсткого пункту

$$\begin{aligned}m_{X_i}^l &= \mu \sqrt{Q_{X_{il}}}; \\ m_{Y_i}^l &= \mu \sqrt{Q_{Y_{il}}}; \\ m_{Z_i}^l &= \mu \sqrt{Q_{Z_{il}}},\end{aligned}\quad (10)$$

де $Q_{X_{il}}$, $Q_{Y_{il}}$, $Q_{Z_{il}}$ – відповідні діагональний елемент кореляційної матриці вимірів.

Крім того, обчислюємо середню квадратичну кінематичну похибку визначення висоти i -го пункту в циклі l

$$\begin{aligned}\overline{m_{X_i}^l} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta X_i - \Delta X_i^{ij})^2}{s}}; \\ \overline{m_{Y_i}^l} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta Y_i - \Delta Y_i^{ij})^2}{s}}; \\ \overline{m_{Z_i}^l} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\delta Z_i - \Delta Z_i^{ij})^2}{s}} \quad j \neq i, j \in I,\end{aligned}\quad (11)$$

де I, s – відповідно множина й кількість пунктів, до яких виконано виміри з пункту i .

СКП положення координат пунктів у циклі l відносно першого циклу спостережень із урахуванням похибок вимірів і похибками моделювання кінематики пунктів розраховуємо за такими виразами

$$\begin{aligned}\overline{\overline{m_{X_i}^{l,l}}} &= \sqrt{(m_{X_i}^l)^2 + (m_{X_i}^l)^2 + \sum_{k=2}^l (\overline{m_{X_i}^k})^2}; \\ \overline{\overline{m_{Y_i}^{l,l}}} &= \sqrt{(m_{Y_i}^l)^2 + (m_{Y_i}^l)^2 + \sum_{k=2}^l (\overline{m_{Y_i}^k})^2};\end{aligned}\quad (12)$$

$$\overline{\overline{m_{Z_i}^{l,l}}} = \sqrt{(m_{Z_i}^l)^2 + (m_{Z_i}^l)^2 + \sum_{k=2}^l (\overline{m_{Z_i}^k})^2}.$$

СКП положення кожного пункту дорівнюватиме

$$\overline{\overline{m_i^{l,l}}} = \sqrt{(\overline{\overline{m_{X_i}^{l,l}}})^2 + (\overline{\overline{m_{Y_i}^{l,l}}})^2 + (\overline{\overline{m_{Z_i}^{l,l}}})^2}.\quad (13)$$

Результати

Вихідними даними для визначення істинного просторового положення пунктів мережі та вибору найстабільніших пунктів слугували проекції вимірних векторів на відповідні координатні осі. Наведену методику й алгоритм обчислень реалізовано в пакеті MATHCAD. На рис. 7 наведено графіки значень загальних кінематичних коефіцієнтів для кожного пункту мережі.

За величиною цих коефіцієнтів можна судити про стабільність того чи іншого пункту (що менший коефіцієнт, то стабільніший цей пункт). Аналізуючи графік, наведений на рис. 7, можна зробити висновки, що пункти R2G, ACP2, MP2 та PP4 мають найменші нормовані кінематичні коефіцієнти ($K_r = 0,04-0,06$). З чого можна зробити висновок про їхню стабільність. Пункти R1G, MP6 та PP3 найменш стабільні в цій мережі (особливо MP6, $K_r = 0,26$).

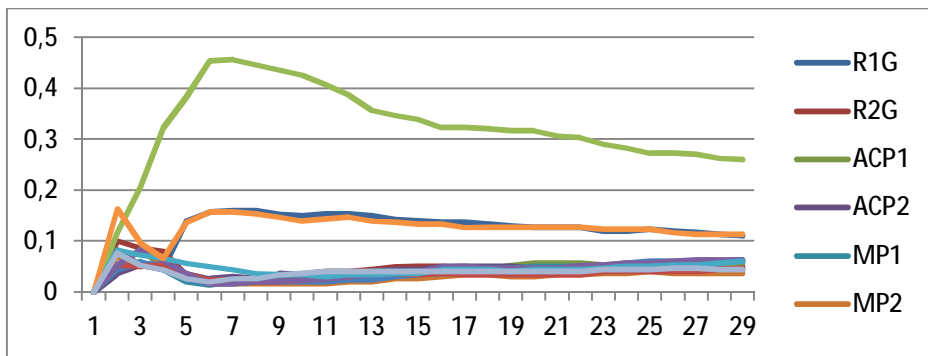


Рис. 7. Значення загальних нормованих кінематичних коефіцієнтів K_r
 Fig. 7. values of general normalized coefficients K_r

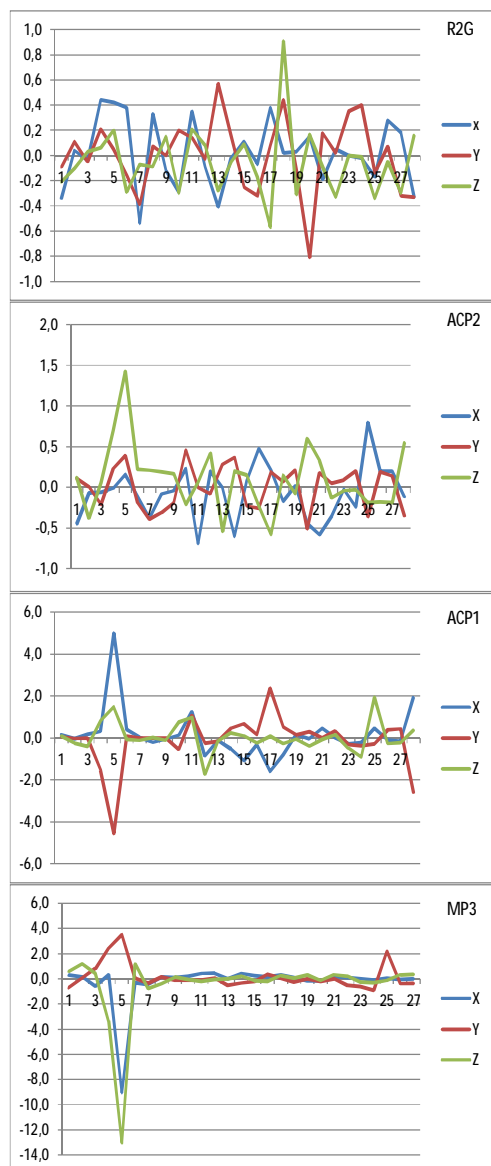


Рис. 8. Графіки зміни координат X, Y, Z відносно першого циклу спостережень пунктів з мінімальною (R2G, ACP2) та максимальною (ACP1, MP3) зміною координат (мм)
 Fig. 8. X, Y, Z coordinates changes relatively

Особливу увагу необхідно звернути на пункт R1G ($K_r = 0,11$), який є вихідним у цій мережі. Великий кореляційний коефіцієнт цього пункту, на нашу думку, пов'язаний з розташуванням ЛЕП та трансформаторних підстанцій поблизу антени ГНСС-приймача. На основі врівноважених значень координат X, Y та Z усіх пунктів мережі з урахуванням кінцевих зміщення пунктів, викликаних деформацією мережі, складені графіки зміни кожної з координат відносно першого циклу спостережень. На рис. 8 наведено графіки для пунктів з мінімальною (R2G, ACP2) та максимальною (ACP1, MP3) зміною координат. За змінами координат відносно першого циклу спостережень побудовано графік зміни загальних зміщень кожного пункту, який наведено на рис. 9

З графіку, наведеного на рис. 9, видно, що зміщення усіх пунктів мережі, за винятком пунктів MP3 та ACP1, мають незначний лінійний тренд та за абсолютним значенням коливаються в межах 1–4 мм. Максимальні зміщення пунктів MP3 та ACP1 є дуже великими 18 та 9 мм відповідно. На нашу думку, такі величини зміщень пов'язані з роботою козлових кранів поблизу розташування пунктів (рис. 11). Причому, за зміною величини зміщення для пункту ACP1 можна стверджувати, що крани перебувають у постійній роботі (рухаються). Оцінено точність результатів опрацювання з урахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі. Обчислені

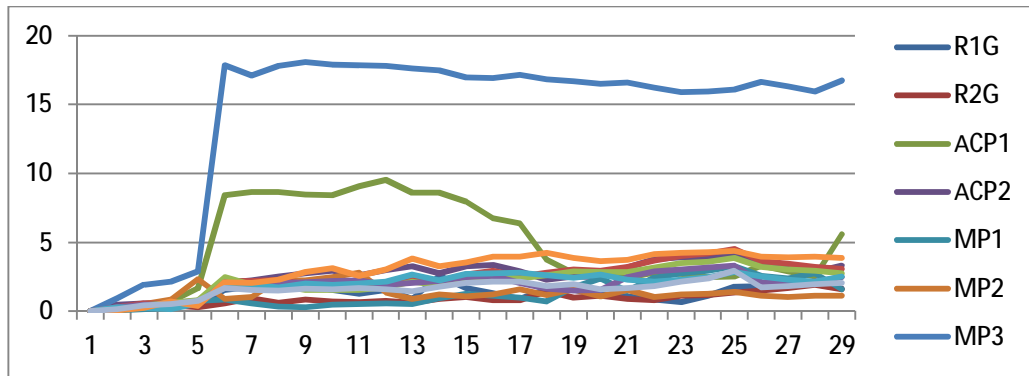


Рис. 9. Графік зміни загальних зміщень пунктів відносно першого циклу спостережень (мм)
 Fig. 9. the graphic of general displacements of all points relatively to the first cycle

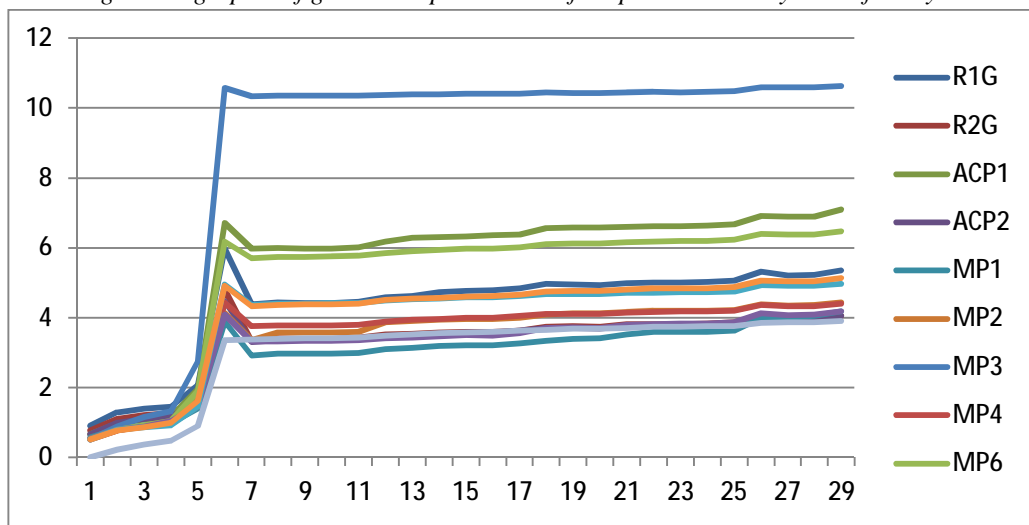


Рис. 10. СКП просторового положення пунктів з урахуванням похибок вимірів і похибок кінематики мережі (мм)
 Fig. 10. Mean square error of coordinates determinations with consideration of observations errors and network kinematic errors



Рис. 11. Наявність перешкод поблизу пунктів MP3, MP5 та ACP1
 Fig. 11. The presence of obstructions near MP3, MP5 and ACP1 points

СКП для кожної з координат X, Y та Z, а також СКП положення кожного пункту (рис. 10). З графіка, наведеного на рис. 10, помітно, що після 5–6 циклів спостережень різке зростання точності визначення просторового положення пунктів припиняється.

Для порівняння одержаних результатів з центру опрацювання даних одержано врівноважені координати пунктів мережі. Врівноваження проводилося з використанням програмного забезпечення Bernese, опрацювання виконували відносно 11 перманентних ГНСС станцій мережі EPN (рис. 1). За вихідні ми прийняли координати станцій та швидкості їх змін у системі ITRF2008 на епоху 01.01.2014, які були отримані на офіційному сайті ITRF [www.itrf.ensg.ign.fr].

Автоматизацію процесу опрацювання даних в програмі Bernese забезпечує модуль Bernese Processing Engine (BPE). Робота BPE реалізується на основі спеціальних файлів-сценаріїв обробки. Для виконання наших обчислень використовували стратегію RNX2SNX.

RNX2SNX складається з шести етапів:

- копіювання необхідних даних;
- підготовка ефемерид, файлів полюсів та поправок годинників;
- формування базових ліній, попередня обробка, відбракування фазових вимірів, збереження NEQ-файлів;
- плаваючий мережевий розв'язок;
- фіксований мережевий розв'язок;
- формування звітів, запис результатів, очистка тимчасових файлів.

У результаті опрацювання зберігаються файли остаточних координат, остаточних розв'язків, звіту з опрацювання даних.

У результаті опрацювання сесій добових ГНСС-спостережень ми отримали координати пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу Канівської ГЕС та середні квадратичні помилки їх визначення в системі координат ITRF2008.

За змінами координат відносно першого циклу спостережень побудовано графік зміни загальних зміщень кожного пункту, який наведено на рис. 12, та СКП просторового положення пунктів (рис. 13). Аналізуючи одержані результати, можна зробити висновки, що обидва методи врівноваження дають практично однакові результати (за винятком пункту R2G). З графіка, наведеного на рис. 12, видно, що зміщення усіх пунктів мережі з винятком пунктів MP3, R2G та ACP1 мають незначний лінійний тренд та за абсолютним значенням коливаються в межах 2–6 мм. Максимальні зміщення пунктів MP3 та ACP1 є дуже великими 20 та 22 мм відповідно. Максимальні зміщення пункту R2G припадають на період з 4 по 15 березня, що, на нашу думку, пов'язане з помилками даних, одержаних системою моніторингу. Тобто, запропонована методика врівноваження дає дещо кращі результати, що безперечно є важливим для досягнення максимальної точності та надійності результатів, одержаних системою автоматизованого геодезичного моніторингу станції, а також дає змогу опрацювати результати на локальному рівні системи автоматизованого геодезичного моніторингу.

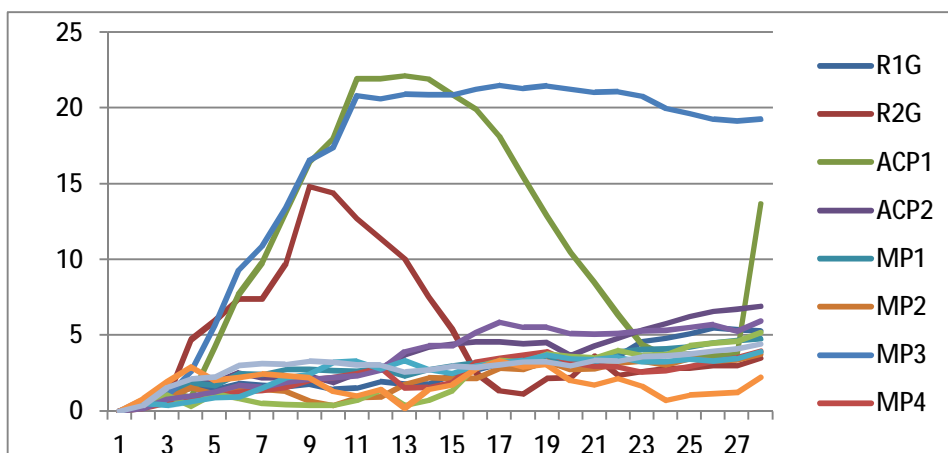


Рис. 12. Графік зміни загальних зміщень пунктів відносно першого циклу спостережень за результатами врівноваження в Bernese (мм)
 Fig. 12. the graphic of general displacements of all points relatively to first cycle by the Bernese adjustment (mm)

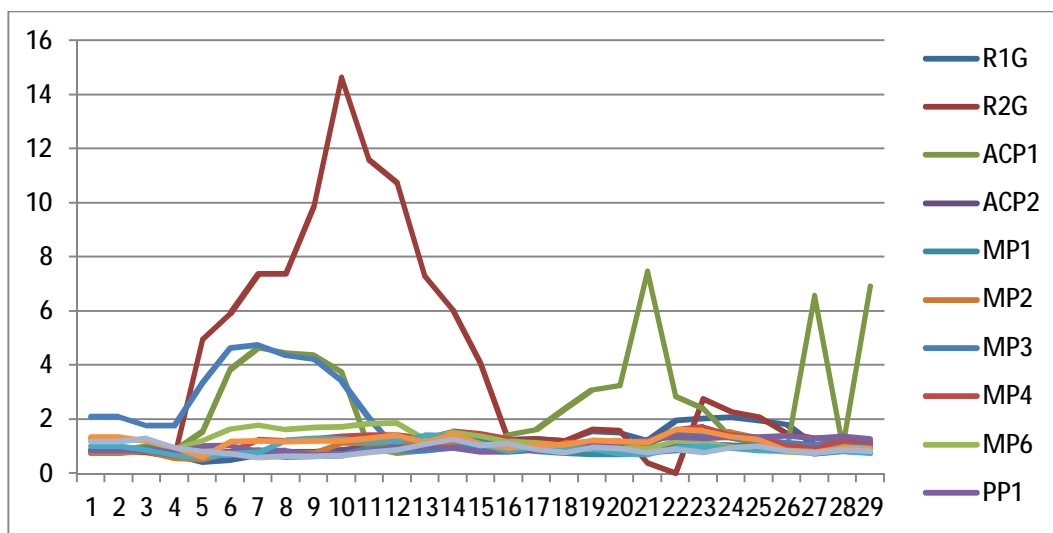


Рис. 13. СКП просторового положення пунктів за результатами врівноваження в Bernese (мм)

Fig. 13. Mean square error of coordinates determinations by the Bernese adjustment (mm)

Наукова новизна та практична значущість

Запропонована методика визначення СПП мережі, що спричинено її деформацією та похибками вимірів, дає змогу аналізувати стійкість пунктів з урахуванням кінематики кожного пункту, а також вибирати найстабільніші пункти мережі. Застосування цієї методики дає можливість використовувати програмне забезпечення Leica GeoMoS для опрацювання результатів, одержаних системою автоматизованого геодезичного моніторингу ГЕС.

Зміни координат пунктів мережі, одержані за результатами врівноважень цією методикою та за результатами врівноваженням у програмному комплексі Bernese, є практично однаковими. Це дасть можливість використовувати цю методику врівноваження локальних мереж кожної з ГЕС замість дорожчого і складнішого в реалізації програмного забезпечення Bernese, та без прив'язки до перманентних базових станцій.

Проведена оцінка точності дає інформацію не тільки про СКП, які спричинені похибками вимірів, але й похибками моделювання кінематики пунктів.

Таку методику опрацювання результатів спостережень можна використати для подальшого прогнозування кінематики опорних просторових мереж.

Висновки

Аналізуючи результати досліджень, можна зробити такі висновки:

1. Розроблена методика, яка дає змогу аналізувати стійкість пунктів з урахуванням кінематики кожного пункту, а також вибирати найстабільніші пункти мережі. Ці результати дають можливість опрацьовувати дані спостережень, які одержані системою автоматизованого геодезичного моніторингу станції, в програмному забезпеченні Leica GeoMoS без використання програмного забезпечення Bernese та без прив'язки до перманентних базових станцій.
2. На прикладі ГНСС-мережі, створеної на Канівській ГЕС, виконано дослідження кінематики пунктів і встановлено величини кінематичних коефіцієнтів для кожного пункту. За величиною цих коефіцієнтів зроблено висновки про стабільність пунктів мережі.
3. На основі врівноважених значень координат усіх пунктів мережі складені графіки зміни кожної з координат відносно першого циклу спостережень. За цими даними знайдено зміни загальних зміщень положення кожного пункту. Максимальні зміщення відбулися на пунктах MP3 – 18 мм та ACP1 –

9 мм, решта пунктів мають незначний лінійний тренд, та за абсолютним значенням коливаються в межах 1–4 мм (рис. 9).

4. Проведено оцінку точності за результатами врівноваження мережі. СКП, які зумовлені похибками вимірів змінюються в межах 0,7–1,3 мм, а СКП, які викликані похибками моделювання кінематики пунктів, знаходяться в межах 3,9–10,6 мм. Загальні значення СКП змінюються від 3,9 до 10,6 мм (рис. 10).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Баран П. І. Інженерна геодезія / П. І. Баран. – К.: Видавництво ВІПОЛ, 2012. – С. 618.
- Волков В. И. К вопросу об исследованиях кинематики приповерхностных слоев земной коры / В. И. Волков, Ю. В. Вершинина // Инженерно-экологические системы: материалы междунар. научн.-практич. конф. (СПб, 10–12 октября 2012 г.). – СПб., 2012. – С. 194–198.
- Ганьшин В. Н. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов / В. Н. Ганьшин, А. Ф. Стороженов, Н. А. Буденков и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – С. 190.
- Калинченко И. С. Разработка технологических решений и исследования по оптимизации методики геодезического мониторинга геотехнических систем Заполярья : диссертация кандидата технических наук: 25.00.32 / И. С. Калинченко [Место защиты: ФГБОУ ВПО “ОмГАУ им. П. А. Столыпина”]. – Ом., 2014. – С. 166.
- Кузнецов О. Ф. Инженерная геодезия / О. Ф. Кузнецов. – М.: МГСУ, 2010. – 363 с.
- Марфенко С. В. Геодезические работы по наблюдению за деформациями сооружений: учеб. пособие / С. В. Марфенко. – М.: Изд-во МГУГиК, 2004. – С. 35.
- Третяк К. Р. Оптимізація кінематичних геодезичних мереж: дис... д-ра техн. наук: 05.24.01 / К. Р. Третяк // Національний ун-т “Львівська політехніка”. – Львів, 2004 – С. 341.
- Шеховцов Г. А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений: монография / Г. А. Шеховцов, Р. П. Шеховцова // Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – С. 156.
- Ашраф, А. Бешр. Разработка и совершенствование технологии определения деформации инженерных сооружений с помощью современных высокоточных геодезических способов и средств изменений: диссертация кандидата технических наук: 25.00.32 / Ашраф Абдель Ванис Абдель Мавла Бешр; [Место защиты: Сиб. гос. геодез. акад.]. – Новосибирск, 2010. – С. 205.
- Acton J. M. Why Fukushima Was Preventable; Carnegie Endowment for International Peace / Acton J. M., Hibbs M. – Washington, D.C. – 43 p.
- Aksamitauskas V. Č. “Investigation of error sources measuring deformations of engineering structures by geodetic methods” in 10th International modern building materials, structures and techniques / V. Č. Aksamitauskas, D. Rekus, A. Wasilewski // May 19–21, 2010, Vilnius, Lithuania. – Vilnius: Technika. – P. 1071–1076.
- Ehigiator I. Modification of Geodetic Methods for Determining the Monitoring Station Coordinates on the Surface of Cylindrical Oil Storage Tank / A. Beshr Ashraf, J. O. Ehiorobo and O. M. Ehigiator // Research Journal of Engineering and Applied Sciences (RJEAS) 1 (1). – 2012. – P. 58–63. A United State Academy publications USA DOI:10.4028/AMR.367.475.
- Kersting N. Kinematische Modelle zur Analyse rezenter krustenbewegungen und ihre anwendung auf die daten des testnetzes Pfungstadt / N. Kersting, W. Welsch // Veroff. Dtsch. geod. kommis. Bayer. Akad. Wiss. – No 283. – 1987. – P. 135–166.

К. Р. ТРЕТЯК¹, С. Л. ПЕТРОВ^{2*}, Ю. И. ГОЛУБИНКА³, Ф. К. Ф. АЛЬ-АЛУСИ¹

¹Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандеры 12, Украина, 79013

²Кафедра инженерной геодезии, Национальный университет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандеры 12, Украина, 79013, тел. +38 (032) 2582387, эл. почта petrovsl06@gmail.com

³Кафедра инженерной геодезии, Национальный университет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандеры 12, Украина, 79013

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПУНКТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ КАНЕВСКОЙ ГЭС

Цель. В рамках проекта восстановления гидроэлектростанций на Каневской ГЭС специалистами компании Leica Geosystems совместно с Укрэнерго создана система автоматизированного геодезического мониторинга в состав которой входят: роботизированные электронные тахеометры, ГНС-

приемники, инклинометры, работающие синхронно и передающие результаты наблюдений в единый центр обработки данных. Основная идея системы мониторинга заключается в интеграции различных компонентов геодезических измерений для достижения максимальной точности и надежности результатов. С марта 2014 система мониторинга начала отправлять результаты суточных ГНСС-наблюдений на Каневской ГЭС. За март полученные суточные файлы наблюдений 77 векторов сети. **Методика.** Для проведения обработки результатов измерений полученных системой автоматизированного геодезического мониторинга в программном пакете Leica GeoMoS необходимо знать наиболее стабильные пункты сети. То есть необходимо определить пространственные положения пунктов на эпоху соответствующего цикла наблюдений с учетом смещения всех пунктов сети, и выбрать наиболее стабильные пункты. Для этого используя величины проекций измеренных векторов на соответствующие координатные оси Δx , Δy , Δz для каждого повторного цикла наблюдений выполнено уравнивание параметрическим методом. По этим данным найдено средние квадратические отклонения проекции вектора между всеми пунктами от его средней величины. Также вычислено ненормированные и нормированные кинематические коэффициенты для каждого пункта, величины которых свидетельствуют об их стабильности. По величинам средневесовых оползней по осям координат каждой пары пунктов с учетом кинематических коэффициентов найдено средневесовое смещение всей сети вызвано ее деформацией, смещение средней высоты сети по результатам уравнивания и конечные смещения пунктов вызванные деформацией сети. По результатам уравнивания каждого цикла полученные средние квадратические погрешности (СКП) определения координат с учетом погрешностей измерений и погрешностей моделирования кинематики пунктов. Полученные результаты использованы для определения наиболее стабильных пунктов сети. **Результаты.** Получены общие смещения пунктов относительно первого цикла наблюдений и среднеквадратичные погрешности пространственного положения пунктов с учетом погрешностей измерений и погрешностей кинематики сети. **Практическая значимость.** Предложена методика определения СПП сети, что вызвано ее деформацией и погрешностями измерений позволяет проводить анализ устойчивости пунктов с учетом кинематики каждого пункта а также осуществлять выбор наиболее стабильных пунктов сети. Применение этой методики позволяет использовать программное обеспечение Leica GeoMoS для обработки результатов полученных системой автоматизированного геодезического мониторинга ГЭС.

Ключевые слова: система автоматизированного геодезического мониторинга; результаты суточных ГНСС-наблюдений; кинематика сети; смещение пунктов вызванные деформацией сети; стабильность пунктов сети; прогнозирования кинематики опорных пространственных сетей

K. R. TRETYAK¹, S. L. PETROV^{2*}, YU. I. HOLUBINKA³, F. K. F. AL-ALUSI¹.

¹Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013

² Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, tel. +38 (032) 2582387, e-mail petrovs106@gmail.com

³ Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013

ANALYSIS OF STABILITY OF POINTS OF AUTOMATED GEODETIC MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES KANEV HPP

Aim. As part of the project of renovation of hydropower plants on the Kaniv hydropower plants (HPP) the experts of Leica Geosystems together with Ukrhydroenergo had created a system of automated geodetic monitoring comprising: robotic electronic total stations, GNSS receivers, inclinometers that work synchronously and communicate observations into a single data centers. The basic idea of monitoring is to integrate the various components of geodetic measurements for maximum accuracy and reliability of results. Since March 2014 the monitoring system has started to send the results of daily GNSS-observations on Kanivska HPP. During March it were received files of daily observations of 77 vectors. **Methods.** For the processing of the measurement results obtained by the automated system of geodetic monitoring using software package Leica GeoMoS it is necessary to know the most stable points of the network. Therefore it is necessary to determine the spatial position of points in the era of the corresponding series of observations, taking into account the displacement of all network points, and select the most stable points. With this purpose, for each repeated cycle of observations it was implemented the adjustment by parametric method using the values of the measured vectors projections on corresponding axes Δx , Δy , Δz . Relating to these data standard deviations of vector projection between all points from its average value were determined. Also no normalized and normalized kinematic coefficients were calculated for each point, the value of which indicates their stability. Basing on weight-average displacements along coordinate axes of each pair of points and taking into account the kinematic coefficients fit was determined the weight-average displacement of whole network caused by its deformation, displacement of medium height of the network using adjustment results and final points displacements caused by the deformation of the network. According to the results of each cycle adjustment it was obtained the mean square error (MSE) of coordinate determination taking into account errors of measurement

and errors of simulation of point's kinematics. The obtained results are used to determine the most stable points of the network. **Results.** The general points displacement relative to the first cycle of observations and RMS error of the spatial position of points, taking into account errors of measurement errors i kinematics network, had been obtained. **The practical significance.** The proposed method of determination average spatial position of the network, which is caused by its deformation and measurement error, allows to carry out analysis of the stability of points with regard to the kinematics of each point as well as to select the most stable points of the network. Application of this method allows to use the software Leica GeoMoS for processing of results obtained by the automated system of geodetic monitoring of hydropower plants.

Key words: system of automated geodetic monitoring; results daily GNSS-observations; kinematics of the network; displacement of points caused by the deformation of the network; stable points network; prediction of the kinematics of reference spatial networks

REFERENCES

- Baran P. I. Inzhenerna heodeziya [Engineering Geodesy]. Kyiv, Publisher, VIPOL, 2012, 618 p.
- Volkov V. Y., Vershynyna Yu. V. K voprosu ob yssledovanyakh kynematyky pryverkhnostnykh sloev zemnoy kory [To a question about the research of the kinematics of the surface layers of the earth's crust], Ynzhenerno-ekolohycheskye systemy: materyaly mezhdunar. nauchn.-praktych. konf. [Engineering and environmental systems: proceedings of the international scientific-practical konfrentsii] (SPb, 10–12 oktober 2012 y.), Sankt-Peterbyrg, 2012, pp. 194–198.
- Ganshin V. N. Storozhenko A. F. Budenkov H. A and others Heodezycheskye metody yzmerenyya vertykal'nykh smeshchenyy sooruzhenyy y analiz ustoychivosty reperov [Geodetic methods for measuring vertical displacements of structures and analysis of stability of fixed reference points]. 2nd ed., Rev. and add. Moscow: Nedra, 1991, 190 p.
- Kalynchenko Y. S. Razrabotka tekhnolohycheskykh resheniy i yssledovannya po optymizatsyy metodyky heodezycheskoho monytorynha heotekhnnycheskykh system Zapolyaryya : dySSERTatsyya kandydata tekhnnycheskykh nauk: 25.00.32 [Development of technological solutions and Research on optimization techniques geodetic monitoring of geotechnical systems Polar region: the dissertation of the candidate engineering science: 25.00.32]. Mesto zashchity: FHBOU VPO ЭОМHAU ym. P. A. StolypynaЭ. Omsk, 2014, 166 p.
- Kuznetsov O. F Inzhenerna heodeziya [Engineering Geodesy]. Moscow, MSSU, 363 p.
- Marfenko S. V. Heodezycheskye raboty po nablyudenyuu za deformatsyyamy sooruzhenyy: Uchebnoe posobyе. [Geodetic works Observer deformations structures: Tutorial]. Moscow, Yzd-vo MHUHyK, 2004, 35 p.
- Tretyak K. R. Optymizatsiya kinematychnykh heodezychnykh merezh: dys... d-ra tekhn. nauk: 05.24.01 [Optimization of kinematic geodetic networks: dissertation of. Dr. Sc. sciences: 05.24.01]. [Lviv Polytechnic National University]. Lviv, 2004, 341 p.
- Shekhovtsov H. A., Shekhovtsova R. P. Sovremennyye heodezycheskye metody opredelenyya deformatsyy ynzhenernykh sooruzhenyy: monohrafiya; [Modern geodetic methods for determining the deformation of engineering structures: Monograph]. Nyzhehorodskyy hosudarstvennyy. arkhytekturno.-stroytel'nyy unyversytett [Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering]. N. Novhorod, NNHASU, 2009, 156 p.
- Ashraf, A. Beshr. Razrabotka y sovershenstvovanye tekhnolohy opredelenyya deformatsyy ynzhenernykh sooruzhenyy s pomoshch'yu sovremennykh vysokotochnykh heodezycheskykh sposobov y sredstv yzmenenyy: dySSERTatsyya kandydata tekhnnycheskykh nauk: 25.00.32 [Development and improvement of technologies of determination of deformations of engineering structures using modern high-precision geodetic methods and means of change: the dissertation of the candidate of technical sciences: 25.00.32. [Defense Place: Sib. Reg. geodesy. Acad.]. Novosibirsk, 205 p.
- Acton J. M., Hibbs M. Why Fukushima Was Preventable; Carnegie Endowment for International Peace. Washington, D.C., 2012, 43 p.
- Aksamitauskas V. Č., Rekus D., Wasilewski A. "Investigation of error sources measuring deformations of engineering structures by geodetic methods" in 10th International modern building materials, structures and techniques. May 19–21, 2010, Vilnius, Lithuania. Vilnius, Technika, pp. 1071–1076.
- Ehigiator I. Ashraf A. Beshr, Ehiorobo J.O.and Ehigiator O.M. Modification of Geodetic Methods for Determining the Monitoring Station Coordinates on the Surface of Cylindrical Oil Storage Tank. Research Journal of Engineering and Applied Sciences (RJEAS) 1 (1), 2012, pp. 58–63. A United State Academy publications USA DOI:10.4028/ AMR.367.475.
- Kersting N., Welsch W. Kinematische Modelle zur Analyse rezenter krustenbewegungen und ihre anwendung auf die daten des testnetzes Pfungstadt. Veroff. Dtsch. geod. kommis. Bayer. Akad. Wiss., No 283, 1987, pp. 135–166.