

І. Р. САВЧИН*, М. В. ДУМА

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, *тел. 097-14-37-858, ел. пошта: savchyn.ih@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ОПОРНОЇ ГНСС-МЕРЕЖІ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

Мета. Розроблення концептуальних основ та пропозицій щодо оптимізації геометрії опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС, а також визначення способів підвищення точності результатів ГНСС-вимірювань. **Методика.** Для вибору оптимального геометричного розміщення нових, а також уточнення положення наявних пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС розроблено спеціальну методику оптимізації геометричної конфігурації мережі, яка полягає в пошуку положення пунктів, за якого значення критеріїв оптимізації буде мінімальним. Як критерій оптимізації використано детермінант коваріаційної матриці. **Результати.** Розроблено методику оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання. У результаті огляду пунктів на місцевості, а також детального аналізу проведених та опрацьованих вимірювань виділено три основні проблемні групи пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС: пункти із незадовільним прийомом супутникового сигналу; пункти з центруванням зі штативу; пункти пошкоджені під час будівництва. Для покращення жорсткості та точності опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС необхідно: вилучити з програми ГНСС-вимірювань чотири пункти (ПОРТАЛ-2, НИЖНІЙ, ОЗС-1-1 та ОЗС-23-2); підсилити спільними супутниковими та лінійно-кутовими вимірюваннями 4 пункти (ГЗ-10, ГЗ-11А, ГЗ-11Б та ГЗ-12); замінити 4 наявні пункти (ПП-221, ПП-100, ОБРИВ та ОГЗ-1) та встановити 4 нові пункти (ГЗ-21, ГЗ-22, ГЗ-23 та ГЗ-24). Для встановлення нових пунктів виділено чотири зони, що потребують контролю. Оптимізація опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС із використанням розробленої методики покращила точність на 8,3–10,0 % залежно від кількості використаних ГНСС-приймачів. **Наукова новизна та практична значущість.** Запропоновано нову методику оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання. Використовуючи цю методику, виконано оптимізацію опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС. Наведену методику також можна застосувати для оптимізації будь-яких геодезичних мереж моніторингу.

Ключові слова: оптимізація; D -критерій, ГНСС-мережа, геометрична конфігурація пунктів мережі, Дністровська ГАЕС.

Вступ

В 2003 р. для супроводу будівництва та спостережень за деформаціями схилів у районі розташування основних гідроенергетичних споруд створено опорну ГНСС-мережу Дністровської ГАЕС. Закладена мережа складалася із 15 пунктів, умовно поділених на каркасну та робочу мережі, які відповідно налічували 7 та 8 пунктів [Третяк, 2012; Сідоров, 2015]. Починаючи з 2004 року на пунктах даної мережі проводяться періодичні статичні супутникові вимірювання (сезонними циклами). В результаті аналізу та опрацювання даних вимірювань встановлено, що середні квадратичні похибки (СКП) визначення координат не перевищували 2 мм – для пунктів з примусовим центруванням та 3 мм – для пунктів з центруванням зі штатива [Третяк, 2012]. Даний метод вважається класичним методом супутникових вимірювань. Принцип якого полягає в тому, що проводяться одночасні, вимірювання між двома і більше нерухомими ГНСС-приймачами. Тривалість сеансу спостережень залежить від довжини вимірюваних ліній, кількості одночасно видимих супутників, типу приймачів і необхідної точності. Такий метод широко використовувався для моніторингу ряду українських ГЕС: Київської ГАЕС (2003, 2004 – Укринжгеодезія, 2009 – ПП «Инжгео»); Канівської ГЕС (травень, жовтень 2007, 2010 – НУ «ЛП»); Кременчуцької ГЕС (2000, 2001 – Укринжгеодезія, 2007 – НУ «ЛП»); Дніпродзержинської ГЕС (травень, жовтень 2007 – НУ «ЛП»); Дніпровської ГЕС (1997 (2 цикли) – Укринжгеодезія, 2005, 2010 – НУ «ЛП») [Бисовецкий, 2011]. Слід зазначити, що протягом досліджуваного періоду для даних об'єктів точність визначення горизонтальних зміщень становила 2 мм, а вертикальних – 3 мм. В [GPS Technology Used in Three Gorges Reservoir Landslide Deformation Monitoring, Liu та ін., 2008] представлено застосування даного методу для моніторингу зміщень найпотужнішої в світі ГЕС Три ущелини (Китай).

Застосування статичного методу забезпечило точність визначення координат – 1 мм.

Проведений аналіз підтверджує доцільність проведення багатодобових надлишкових супутникових вимірювань з їх подальшою постобробкою в спеціалізованому програмному забезпеченні. Проте використання такого методу спостережень накладає певні вимоги щодо геометрії самої мережі, якості закладки геодезичних пунктів та їх розташуванні на місцевості.

Опорну ГНСС-мережу Дністровської ГАЕС розширювали і деталізували в процесі будівництва станції (рис. 1), тому в даний час на досліджуваній території знаходиться 43 пункти спостереження [Дума, 2016].

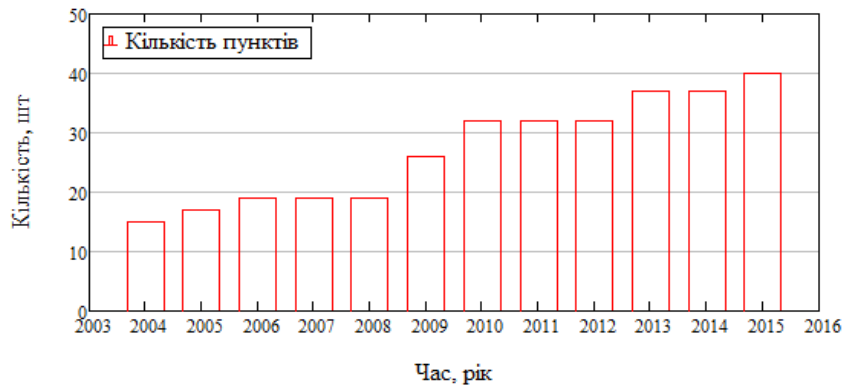


Рис. 1. Процес деталізації та розширення опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС

Проте, процес деталізації та розширення опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС проводився без використання методів проектування та оптимізації. Результатом цього є те, що дана мережа є значно витягнутою у північному напрямку вздовж Дністра і не є збалансованою; щільність пунктів не є однаковою; значна кількість пунктів є слабкими, через погану видимість супутників тощо. У зв'язку з цим для якісного виявлення та врахування дії даних чинників опорна ГНСС-мережа Дністровської ГАЕС потребує проведення періодичного аналізу проблемних ділянок та уточнення конфігурації розміщення пунктів. Такі дії призведуть до досягнення максимально можливого результату контролю.

Мета

Розроблення концептуальних основ та пропозицій щодо оптимізації геометрії опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС, а також визначення шляхів підвищення точності результатів ГНСС-вимірювань, для досягнення максимально можливого результату контролю.

Методика

Одним з основних завдань геодезистів є визначення просторового положення пунктів, які розміщені на об'єктах різного призначення. Сукупність всіх пунктів призначених для визначення просторового положення об'єкту називається геодезичною мережею. Відповідно до [Berne, 2004] всі пункти в геодезичній мережі можна поділити на три групи: деформаційні, референсні, орієнтаційні. Розташування пунктів кожної групи зумовлюється формою та розміром, а також топографічними і геологічними особливостями об'єкту моніторингу. Відповідно до [Grafarend, 1974] існує чотири етапи проектування та оптимізації геодезичних мереж різного призначення:

Нульовий етап (Zero-Order Design): вибір оптимальної системи відліку. На цьому етапі підшукується оптимальна система координат для мережі. Проте даний етап можна пропустити при проектуванні локальних мереж.

Перший етап (First-Order Design): вибір оптимальної конфігурації мережі. На даному етапі підбирається оптимальна геометрична форма мережі, оптимальна кількість і розташування геодезичних пунктів та схеми вимірювань.

Другий етап (Second-Order Design): вибір оптимальних ваг спостережень. На даному етапі

визначається, яка точність повинна бути досягнута. Основною характеристикою цього етапу є точність.

Третій етап (Third-Order Design): покращення існуючої мережі. На даному етапі шляхом додавання (або видалення) додаткових пунктів та спостережень проводиться покращення існуючої мережі.

Для прикладу, в [Amiri-Simkooei, 2001] представлено алгоритм оптимізації геодезичної мережі моніторингу, який включає перший, другий та третій етапи. На першому етапі проводиться заміна «слабких» точок мережі на жорсткі. В другому етапі збільшується кількість надлишкових вимірювань для точок, які розміщені по периметру мережі. А на третьому етапі для покращення надійності додають зворотні вимірювання «слабких» ліній. В [Amiri-Simkooei, 2007; Berne, 2004] представлено алгоритми оптимізації геометрії розташування пунктів мережі. У першому випадку проводиться оптимізація із використанням параметру надійності, в другому – із використанням значення детермінанта коваріаційної матриці. В обох випадках підбирається геометрична форма мережі, значення точності та надійності вимірювань в якій, будуть найкращими.

Для вибору оптимального геометричного розміщення нових, а також уточнення положення існуючих пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС було розроблено спеціальну методику оптимізації геометричної конфігурації мережі, яка полягає в пошуку положення пунктів при якому значення критеріїв оптимізації буде мінімальним. Для реалізації даної методики використано програмне забезпечення MathCAD14. Попередньо було проведено детальний аналіз основних критеріїв оптимізації, а саме: сліду коваріаційної матриці – $A = tr(Q)$, визначника або детермінанта коваріаційної матриці $D = \det(Q)$, максимального власного числа коваріаційної матриці – $E = \lambda_{\max}$ та співвідношення максимального до мінімального власного числа коваріаційної

матриці – $I = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$. В [Al-Zubaidy, 2012] представлено використання D та A -критеріїв для

оптимізації мікро-геодезичних мереж. Встановлено, що оптимізація таких побудов із використанням даних критеріїв призводить до значного покращення точності. D -критерій також використано для оптимізації активних геодезичних мереж моніторингу Дніпровської, Дністровської-1 та Канівської ГЕС [Савчин, 2015]. Використання даного критерію, а також універсальної методики оптимізації дало можливість в 1.5–2.8 разів покращити точність результатів опрацювання при погіршенні надійності на 2.0–7.0%. Відомо, що детермінант відповідає об'єму гіпереліпсоїда похибок утвореного кореляційною матрицею, у зв'язку з цим мінімізація даного критерію є хорошим методом покращення точності мережі, тому в даній методиці було вирішено використати цей критерій.

Структурно методика оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання складається із 3-х взаємопов'язаних блоків (рис. 2.).

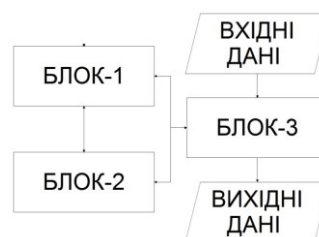


Рис. 2. Взаємозв'язок між блоками методики оптимізації геометричної конфігурації мережі

Fig. 2. The relationship between the blocks of methodologies of optimization geometric network configuration

Блок-1: Обчислення критеріїв оптимізації. Даний блок призначений для врівноваження вимірювань в заданій мережі параметричним методом та обчислення детермінанта коваріаційної матриці. В даному блоці на основі вхідних даних виконується формування параметричної матриці A та матриці ваг P . На основі отриманих результатів обчислюється коваріаційна матриця

$Q = (A^T P A)^{-1}$. Далі виконуються обчислення детермінанта коваріаційної матриці $D = \det(Q)$.

Блок-2: Обчислення напрямку руху кожного пункту при якому спостерігаються зменшення значень критеріїв оптимізації. Даний блок призначений для визначення для кожного пункту мережі оптимального напрямку при якому спостерігаються зменшення значень критеріїв оптимізації. Для пошуку даного напрямку використовується градієнтний метод, який ґрунтується на пошуку приростів детермінанта коваріаційної матриці:

$$\begin{aligned}\nabla x_i &= \frac{F(x_i + l, y_i) - F(x_i - l, y_i)}{2 \cdot l}, \\ \nabla y_i &= \frac{F(x_i, y_i + l) - F(x_i, y_i - l)}{2 \cdot l},\end{aligned}\quad (1)$$

де x_i та y_i – початкові координати i -го пункту мережі; l – стала величина на яку змінювали кожен координату (в даній методиці рекомендовано використовувати 1 метр); $F(x, y)$ – цільова функція для обчислення детермінанта мережі.

В подальшому на основі визначених градієнтів виконуються обчислення напрямків руху кожного пункту при якому спостерігаються зменшення значень критеріїв оптимізації:

$$\operatorname{tg}(\alpha_i) = \frac{\nabla y_i}{\nabla x_i}. \quad (2)$$

Блок-3: Знаходження глобального мінімуму функції та виведення координат оптимальної геодезичної мережі. Даний блок призначений для послідовного переміщення пунктів по заданих напрямках (3) та обчислення критеріїв оптимізації для нових положень пунктів.

$$\begin{aligned}x_i^l &= x_i + S_i^l \cdot \cos(\alpha_i), \\ y_i^l &= y_i + S_i^l \cdot \sin(\alpha_i),\end{aligned}\quad (3)$$

де S_i^l – відстань на яку переміщуватиметься пункт по заданому напрямку. Оскільки по заданому напрямку пункт може переміщуватись до нескінченності, то в такому випадку задача оптимізації може втратити сенс. У зв'язку з цим на процес оптимізації накладено обмеження (радіус зони в межах якої можна переміщати пункт – R), в результаті цільова функція набуде вигляду:

$$\Phi(x, y) = F(x, y) + k \begin{cases} (S_i^l - R_i) \leq 0 & \Rightarrow k = 0, \\ (S_i^l - R_i) > 0 & \Rightarrow k = (S_i^l - R_i) \cdot m, \end{cases} \quad (4)$$

де m – стала величина, яка залежить від кількості пунктів у мережі.

В подальшому виконуються знаходження глобального мінімуму отриманої цільової функції (4) та виведення координат оптимальної геодезичної мережі.

Результати

В результаті огляду пунктів на місцевості, а також детального аналізу проведених та опрацьованих вимірювань виділено 3 основних проблемних групи пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС.

Пункти із незадовільним прийомом супутникового сигналу: ГЗ-10, ГЗ-11А, ГЗ-11Б, ГЗ-12 (всі над системою водовипуску), ПОРТАЛ-2, НИЖНІЙ, ОЗС-1-1 та ОЗС-23-2 (всі на північно-східному схилі). ГНСС-вимірювання на даних пунктах відбувається в несприятливих умовах: закритість горизонту будівельними та технологічними конструкціями, ландшафтом та рослинністю, а також високий рівень багатопроменевості, що призводить до збільшення похибок визначення координат. Згадані пункти, встановлені на північно-східному схилі не є критично-важливими, тому вважаємо, що їх можна виключити з програми ГНСС-вимірювань, бо вони погіршують загальну точність мережі. Натомість, пункти встановлені над системою водовипуску потребують постійного високоточного контролю, тому пропонуємо визначати їх горизонтальні зміщення спільними супутниковими та лінійно-кутовими вимірюваннями.

Пункти з центруванням зі штативу: ПП-221 та ПП-100. Центрування зі штатива вносить додаткові систематичні похибки в планові координати. Для підвищення точності бажано було б замінити ці пункти на пункти з примусовим центруванням.

Пункти пошкоджені в процесі будівництва: ОБРИВ та ОГЗ-1. Пункт ОБРИВ був пошкоджений під час укріплення схилу в 2014 році, а пункт ОГЗ-1 пошкоджений через переміщення дороги в 2016 році. Для підвищення точності бажано було б замінити ці пункти на нові.

Окрім пунктів, які необхідно видалити чи замінити в процесі аналізу було визначено додаткові зони, що потребують контролю. Із загальної маси виділено чотири таких зони (1-а на північно-західному схилі; 1-а на північно-східному схилі; 2-і на східному березі буферного водосховища) в яких необхідно встановити нові пункти для покращення жорсткості та точності опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС. В роботі зоною вважали площину обмежену колом заданого радіусу, в будь-якій точці якого можна встановити новий пункт. Розмір зони безпосередньо залежав від умов рельєфу та наявності поблизу будівель і споруд, які несли б негативний вплив на якість вимірювань. На рисунку 3а подано схему розміщення всіх існуючих груп пунктів, а також зони пошуку оптимального положення нових пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС.

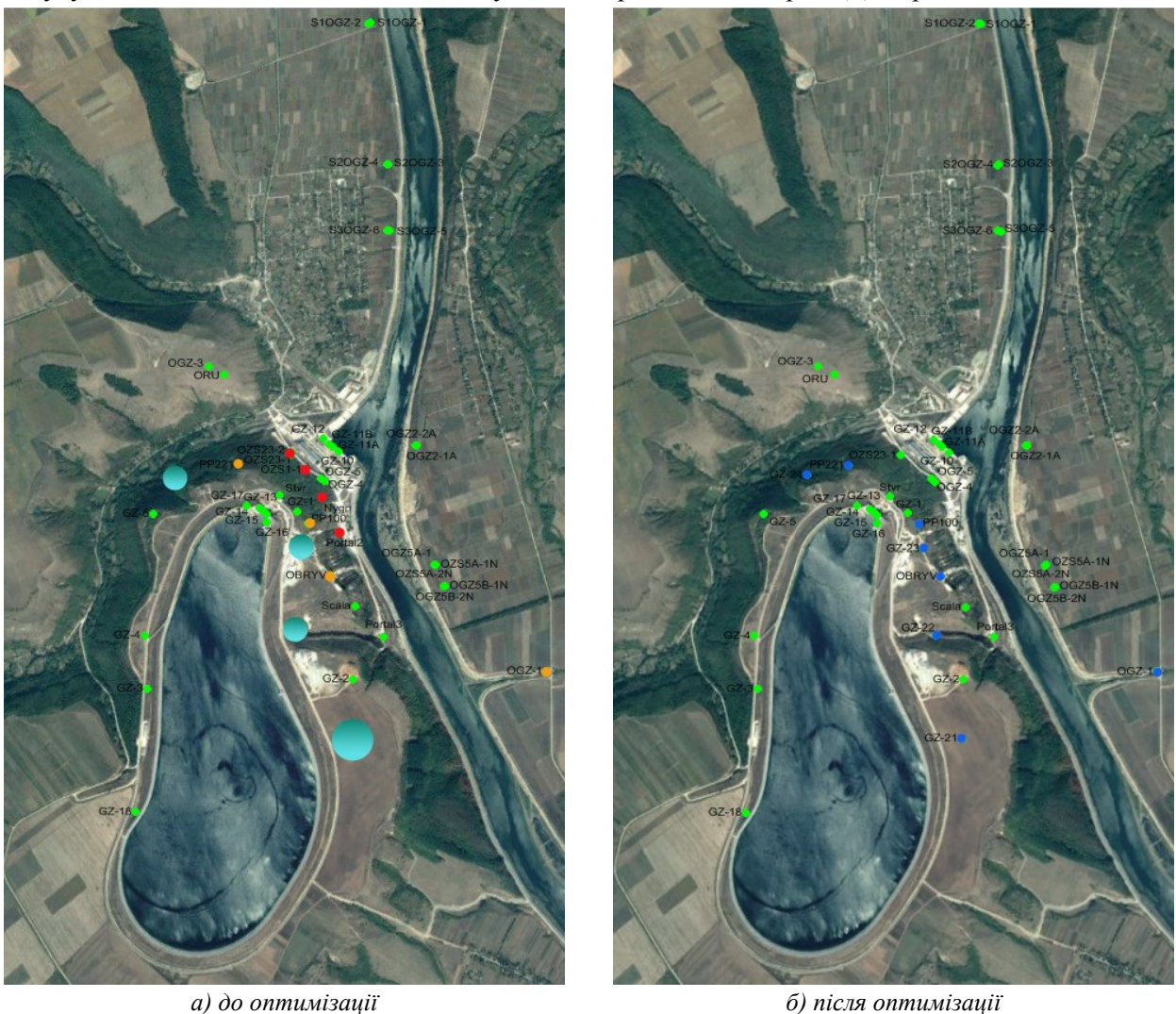


Рис. 3. Схема розміщення пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС (● – добрі пункти мережі; ● – погані пункти мережі; ● – пункти мережі, які потрібно замінити; ● – зони пошуку оптимального положення для нових пунктів мережі; ● – нові положення пунктів мережі)

Отже, в результаті аналізу встановлено, що для покращення жорсткості та точності опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС необхідно:

- виключити з програми ГНСС-вимірювань 4 пункти (ПОРТАЛ-2, НИЖНІЙ, ОЗС-1-1 та ОЗС-23-2);
- підсилити спільними супутниковими та лінійно-кутовими вимірюваннями 4 пункти (ГЗ-10, ГЗ-11А, ГЗ-11Б та ГЗ-12);
- замінити 4 існуючі пункти (ПП-221, ПП-100, ОБРИВ та ОГЗ-1);
- встановити 4 нових пункти (ГЗ-21, ГЗ-22, ГЗ-23 та ГЗ-24).

У зв'язку з цим встановлено, що оптимізації потребують 8 пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС. Для проведення оптимізації використано запропоновану методику оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання. Відповідно до запропонованої методики зони для заміни існуючих та встановлення нових пунктів обмежувались колами заданого радіусу. Оскільки існуючі пункти, які потрібно замінити мали добре розташування, то для них вибрано зони радіусом 10 метрів. Для пошуку оптимального положення нових пунктів ГЗ-22, ГЗ-23 та ГЗ-24 вибрано зони радіусом 20 метрів, натомість для пункту ГЗ-21 – радіусом 30 метрів. Основними параметрами вибору значення радіусу були умови рельєфу та наявність поблизу будівель і споруд. В результаті оптимізації встановлено нові оптимальні положення пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС (рис. 36).

Для апробації оптимізованої опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС проведено апріорне оцінювання її точності. Відповідно до [Третяк, 2005] спостереження в даній мережі проводяться сезонними циклами, в кожному циклі по 3 сесії вимірювань на кожному пункті. Враховуючи, що вектори опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС не перевищують 10 км, то тривалість вимірювань на кожному пункті згідно раніше проведених досліджень повинна бути не менше 6 годин [Галаганов, 2004; Третяк, 2000]. Тобто у даній мережі в кожному циклі вимірюється близько третини із усіх можливих векторів. У зв'язку з цим, для проведення апріорного оцінювання з усіх можливих векторів автоматично вибрано кількість визначену за залежністю $\frac{n \cdot s}{k} \cdot c$, де n – кількість пунктів у мережі; s – кількість сесій вимірювань на кожному пункті; k – кількість доступних ГНСС-приймачів; c – кількість векторів, виміряних в одній сесії. Оскільки спостереження у даній мережі проводились із використанням від 5 до 7 ГНСС-приймачів, тому апріорне оцінювання точності проводилось для таких кількостей. У таблиці 1 подано апріорні середні квадратичні похибки (СКП) визначення координат пунктів мережі до і після оптимізації.

Таблиця 1

Апріорні СКП визначення координат пунктів мережі до і після оптимізації

Кількість ГНСС-приймачів, шт.	СКП визначення координат пунктів мережі		Покращення СКП визначення координат пунктів, %
	до оптимізації, мм	після оптимізації, мм	
5	2.4	2.2	8.3
6	2.2	2.0	9.1
7	2.0	1.8	10.0

Аналізуючи результати наведені в таблиці 1 можна зауважити, що значення апріорних СКП визначення координат пунктів мережі зменшилися після проведення оптимізації. Встановлено, що оптимізація опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС призведе до покращення точності на 8.3-10.0% в залежності від кількості використаних ГНСС-приймачів. Враховуючи те, що опорна ГНСС-мережа Дністровської ГАЕС налічувала 43 пункти, а в процесі оптимізації: вилучено 4 слабких

пункти, встановлено 4 нових пункти, та мінімально змінено положення 4 існуючих пунктів, то отримане значення покращення мережі можна вважати добрим.

Підсумовуючи це можна стверджувати, що оптимізація опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС повністю підтверджує ефективність розробленої методики оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання. Отже, дану методику можна застосувати для оптимізації будь-яких геодезичних мереж моніторингу.

Наукова новизна та практична значущість

Запропоновано нову методику оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання. Використовуючи дану методику, виконано оптимізацію опорної ГНСС-мережі Дністровської ГЕС. Представлену методику можна застосувати для оптимізації будь-яких геодезичних мереж моніторингу.

Висновки

Розроблено методику оптимізації геометричної конфігурації мережі із застосуванням математичного моделювання.

В результаті огляду пунктів на місцевості, а також детального аналізу проведених та опрацьованих вимірювань виділено 3 основних проблемних групи пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС: пункти із незадовільним прийомом супутникового сигналу; пункти з центруванням зі штативу; пункти пошкоджені в процесі будівництва.

Для покращення жорсткості та точності опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС необхідно: виключити з програми ГНСС-вимірювань 4 пункти (ПОРТАЛ-2, НИЖНІЙ, ОЗС-1-1 та ОЗС-23-2); підсилити спільними супутниковими та лінійно-кутовими вимірюваннями 4 пункти (ГЗ-10, ГЗ-11А, ГЗ-11Б та ГЗ-12); замінити 4 існуючі пункти (ПП-221, ПП-100, ОБРИВ та ОГЗ-1) та встановити 4 нових пункти (ГЗ-21, ГЗ-22, ГЗ-23 та ГЗ-24). Для встановлення нових пунктів виділено чотири зони, що потребують контролю.

Оптимізація опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС із використанням розробленої методики призвела до покращення точності на 8.3-10.0% в залежності від кількості використаних ГНСС-приймачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бисовецкий Ю. Автоматизация геодезических наблюдений за гидротехническими сооружениями гидроэлектростанций Укрэнерго / Ю. Бисовецкий, К. Третьяк, Э. Щучик // Гидроэнергетика Украины. – 2011. – №2. – С. 45-51.
- Галаганов О. Геодинамічний моніторинг із застосуванням супутникових технологій деяких районів АЕС / О. Галаганов, Т. Гусева, Л. Лабунцова // Збірник матеріалів ІХ-го міжнародного науково-технічного симпозиуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища". – 2004. – С. 46-48.
- Дума М. Оптимізація конфігурації та розміщення пунктів опорної ГНСС-мережі Дністровської ГАЕС / М. Дума, І. Савчин // Збірник тез Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTegase-2016». – 2016. – С. 68–71.
- Савчин І. Оптимізація активних геодезичних мереж моніторингу інженерних споруд гідроелектростанцій: дис. ... канд. технічних наук: 05.24.01 : геодезія, фотограмметрія та картографія / захищена 30.06.2015 : затв. 29.09.2015 / Савчин Ігор Романович. – Л., 2015. – 135 с.
- Сідоров І. Визначення рухів земної поверхні в районі Дністровської ГАЕС супутниковими та наземними методами / С. Перій, В. Сарнавський // Геодинаміка. – 2015. – № 2(19). – С. 15-25.
- Третьяк К. Оптимізація побудови геодезичної мережі Дністровської ГАЕС супутниковими радіонавігаційними технологіями / К. Третьяк, І. Сідоров // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2005. – С. 207–219.
- Третьяк К. Планування та оптимізація GPS - вимірів у геодезичних мережах / К. Третьяк // Вісник геодезії та картографії. – 2000. – № 3(18). – С. 7-13.
- Третьяк К. Сумісне опрацювання супутникових і наземних геодезичних вимірів високоточної мережі будівництва Дністровської ГАЕС / К. Третьяк, І. Сідоров. //Вісник геодезії та картографії. – 2012. – №3 (78).

– C. 6 – 9.

- Al-Zubaidy R., Mahdi H.A., Hanooka H.S., Optimized Zero And First Order Design Of Micro Geodetic Networks, *Journal of Engineering Sciences*, 2012, vol.18, no.12, December, pp. 1344–1364.
- Amiri-Simkooei A. Analytical first-order-design of geodetic networks. *Iranian journal of engineering sciences*, 2007, no. 1(1), pp. 1–14.
- Amiri-Simkooei A. Strategy for designing geodetic network with high reliability and geometrical strength. *Journal of surveying engineering*, 2001, pp. 104–117.
- Ayan T. Optimization of Geodetic Networks, Associate Professorship Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 1981.
- Berne' J., Baselga S. First-order design of geodetic networks using the simulated annealing method. *Journal of Geodesy*, 2004, no. 78, pp. 47–54.
- Liu H., He C., Zhang A., Liu H-x. GPS Technology Used in Three Gorges Reservoir Landslide Deformation Monitoring. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, no. 25, pp. 33–35.
- Grafarend E. Optimization of geodetic networks. *Bolletino di Geodesia a Science Affini*, 1974, no. 33, pp. 351–406.

Надійшла 19.09.2016 р.