



## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ АКТИВНИХ МОНІТОРИНГОВИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ

*Используя метод математического моделирования, выведено функцию зависимости надежности активных мониторинговых геодезических сетей от определителя ковариационной матрицы (критерия D) и количества пунктов в сетях.*

*Using the method of mathematical modelling it is derived the function of dependence of the reliability of active geodetic networks for deformation monitoring on covariance matrix determinant (D criterion) and the number of points in the networks.*

**Постановка проблеми.** Донедавна спостереження за деформаціями інженерних споруд в основному здійснювались традиційними геодезичними методами. Нині для цього застосовують методи автоматизованого моніторингу, які базуються на використанні роботизованих тахеометрів та ГНСС-технологій. Це дає можливість моніторити ситуацію протягом заданого періоду. Система дозволяє програмно контролювати результат, порівнюючи отримані значення зміщень та деформацій інженерних споруд з граничними значеннями, встановленими користувачем. Вона обладнана звуковою сигналізацією на випадок прояву небезпечних для конструкцій деформацій, про що експлуатаційні служби автоматично інформуються.

*Активною моніторинговою геодезичною мережею (АМГМ)* називається мережа, призначена для проведення моніторингу інженерних споруд у режимі реального часу із застосуванням автоматизованих систем. Пункти цієї АМГМ зазнають безперервних змін свого просторового положення (під дією різних факторів).

Автоматизовані системи моніторингу деформацій мають значні переваги в порівнянні з класичними геодезичними методами, але вони тільки-но почали розвиватися, а є багато факторів, які впливають на процес вимірювання і тому потребують дослідження. На сьогодні відсутні універсальні методики проектування АМГМ, тому кожна така мережа вимагає індивідуальної розробки й апробації технології проведення вимірювань та опрацювання їх результатів.

**Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями.** З 1996 р. Державне підприємство "ВАТ "Укргідроенерго" (до його складу входять: Дніпровська, Дніпродзержинська, Дністровська, Канівська, Каховська, Київська і Кременчуцька ГЕС, а також Дністровська та Київська ГАЕС загальною потужністю 4 840 МВт) виконує програму реабілітації ГЕС, більшість яких побудовано в 1960-х роках. З лютого 2006 р. набула чинності угода з Міжнародним банком реконструкції та розвитку (МБРР) у рамках проекту "Реабілітація гідроелектростанцій" [11]. Угодою передбачено надання Україні кредиту для реабілітації гідроелектростанцій шляхом відновлення 46-ти гідроагрегатів та відповідного обладнання на всіх дев'ятих гідроелектростанціях; модернізації наявних, а також установлення нових систем моніторингу без-

пеки гідроспоруд та відновлення дренажних споруд і затворів водозливу на шести греблях на Дніпрі та на одній греблі на Дністрі. Компанія "Leica Geosystems" реалізовує проект установлення на чотирьох гідроелектростанціях України сучасних автоматизованих систем моніторингу деформацій, які здійснюватимуть геодезичний моніторинг у режимі реального часу. Лабораторія ГНДЛ-18 Інституту геодезії НУ "Львівська політехніка" є співвиконавцем цього проекту.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій з даної проблеми.** Особливості застосування автоматизованих систем для моніторингу об'єктів гідроелектростанцій висвітлено в праці [9]. У ній також описується методика проведення вимірювань, програмні засоби для опрацювання одержаних результатів та схеми передачі інформації від приладів до центру керування.

У брошурі [2] наводяться приклади застосування автоматизованих систем для моніторингу: мосту з кабельною підтримкою Jiangyin (Китай); вантового мосту Tsing Ma Bridge (Гонконг); будівництва хмарочоса Burj Dubai (ОАЕ); будівлі Міжнародного фінансового центру Гонконгу (Китай); льодового палацу в Крилатському (Москва); Алабяна-Балтійського тунелю (Москва); споруд Бурейської, Саяно-Шушенської та Богучанської ГЕС (всі – Росія). Автор публікації стверджує, що система здатна забезпечити безперервний моніторинг об'єктів і про будь-яке зміщення за межі встановленого діапазону автоматично повідомляти оператору.

У публікаціях [3, 4, 6, 9, 10] аналізуються принципи роботи декількох автоматизованих систем, а також наводяться приклади їх застосування для моніторингу інженерних об'єктів.

Щодо часу вимірювань, то в праці [5] автори зазначають, що застосування автоматизованих систем моніторингу деформацій дозволяє скоротити його у 5-10 разів у порівнянні з класичними геодезичними методами.

Питання точності визначення зміщень інженерних споруд остаточно ще не вирішене. Наприклад, у згаданій статті [5] стверджується, що точність визначення координат контрольних точок під час проведення моніторингу стадіону "Донбас-Арена" із застосуванням автоматизованої системи моніторингу деформацій становила 1 мм. А творці системи геодезичного моніторингу Афіньського олімпійського футбольного стадіону [9] доводять, що при використанні найсучаснішого геодезичного облад-



нання та спеціальних пристроїв для примусового центрування можна досягти точності  $\pm 3$  мм.

Огляд публікацій переконує, що кожна з унікальних споруд вимагає розроблення та реалізації оригінальної технології проведення моніторингу і що впровадження систем автоматизованого моніторингу деформацій є перспективним напрямком інженерної геодезії, який дозволить забезпечити комплексне вирішення проблеми спостереження за деформаціями споруд у період їх будівництва та експлуатації. Але в аналізованих джерелах не приділено уваги питанням надійності АМГМ, тому й виникла ідея проведення досліджень у даному напрямку.

**Постановка завдання.** Є багато чинників, від яких залежить точність та достовірність отриманих результатів під час проведення геодезичного моніторингу. Одним із них є стабільна вихідна геодезична мережа. До проведення моніторингу деформацій інженерно-технічних об'єктів із застосуванням автоматизованих систем необхідно дослідити надійність мережі, а також встановити математичну залежність цієї надійності від геометричної форми побудови.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Під *надійністю АМГМ* (або її елементу) розуміють здатність мережі виконувати задані функції протягом якогось часу за певних умов. Надійність характеризують безвідмовністю, відновлюваністю і довговічністю [1]. *Безвідмовність* – це здатність мережі безперервно або упродовж якогось часу зберігати працездатний стан. *Довговічністю* називають здатність мережі зберігати роботоспроможність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту, а *відновлюваністю* – здатність її повертатися після збурення до початкового стану.

Процес, коли мережа повністю або частково видає неправильний результат, називається *відмовою мережі*. Для того щоб мінімізувати відсоток відмови мережі, необхідно, аби АМГМ забезпечувала дотримання таких основних умов:

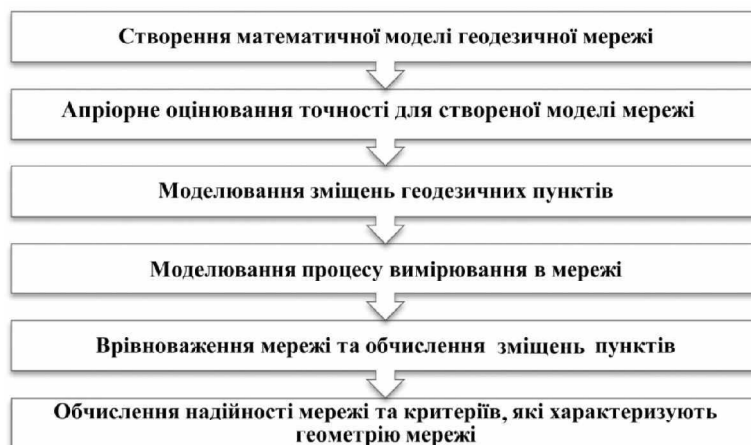
- 1) якщо зміщення пунктів відсутні, похибки вимірювань не повинні інтерпретуватися як зміщення пунктів;
- 2) якщо зміщення пунктів у межах геометричної точності мережі, вони повинні інтерпретуватися як похибки вимірювань;
- 3) якщо зміщення пунктів більші ніж геометрична похибка вимірів у мережі, зміщення не повинні інтерпретуватися як похибки вимірювань у мережі.

Система протягом заданого часу роботи на кожен задану епоху виконує серію геодезичних вимірів. Під серією вимірювань розуміють один цикл спостережень. На основі даних вимірювань визначають координати всіх пунктів геодезичної мережі в заданій системі координат. За результата-

ми двох послідовних циклів визначаються зміщення та деформації інженерних споруд.

Під надійністю системи розуміють достовірність визначення істинних зміщень та деформацій інженерних споруд, а саме відсоткове співвідношення між розв'язками, які не відповідають всім трьом умовам, та загальною кількістю розв'язків.

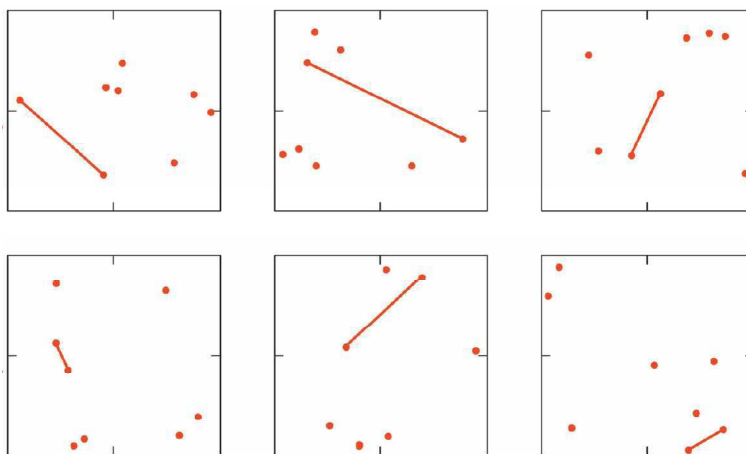
Для дослідження надійності АМГМ використовувався метод математичного моделювання, який базується на теорії імовірності. Дослідження проводилося за алгоритмом (мал. 1), який було реалізовано в програмному середовищі Math CAD.



Мал. 1. Математичний алгоритм

Математичною моделлю геодезичної мережі називається сукупність координат пунктів, яким відповідають довжини ліній та дирекційні кути. Для створення математичної моделі геодезичної мережі (нульового циклу  $(X^0; Y^0)$ ) було використано функцію  $\text{runif}(m, f_1, f_2)$ , яка формує вектор  $m$  незалежних випадкових чисел, що мають рівномірний розподіл. У цьому розподілі  $f_1$  і  $f_2$  є граничними точками інтервалу:  $f_1 < f_2$ . Створені геодезичні мережі були різної геометричної форми (див. мережі з 8-ми пунктів на мал. 2).

Точність вимірювання ліній визначалася за регресійною залежністю  $m_s = a + b \cdot \text{ppm}$ . Для кожної



Мал. 2. Вигляд моделей геодезичних мереж

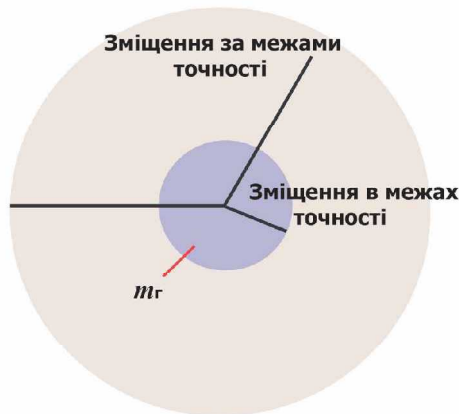


моделі виконувалося апріорне оцінювання точності та визначалася геометрична точність мережі ( $m_T$ ):

$$m_T = \max(m_i); i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

де  $m_i$  – апріорна похибка визначення координат пункту;  $n$  – кількість пунктів у мережі.

Моделювання зміщень геодезичних пунктів також виконувалося, використовуючи функцію *gunif*. Потрібно зазначити, що істинні зміщення пунктів ( $vX_{\text{іст}}$ ;  $vY_{\text{іст}}$ ) моделювалися для двох випадків (мал. 3):



Мал. 3. До питання зміщення пунктів

1) коли зміщення пунктів знаходяться в межах геометричної точності мережі (зміщення в інтервалі  $[-m_T; +m_T]$ );

2) коли зміщення пунктів більші за геометричну точність мережі (зміщення в інтервалі  $[-3m_T; +3m_T]$ ).

Істинні координати пунктів у першому циклі ( $X^I; Y^I$ ) визначалися з виразів:

$$X^I = X^0 + vX_{\text{іст}}^I; Y^I = Y^0 + vY_{\text{іст}}^I. \quad (2)$$

Оскільки досліджувалися тільки лінійні геодезичні мережі, то за отриманими координатами ( $X^I; Y^I$ ) обчислювали істинні довжини ліній для першого циклу ( $S_{\text{іст}}^I$ ).

З допомогою функції *gunif* змодельовали похибки вимірювання довжин ліній у першому циклі спостережень ( $\Delta S^I$ ) в інтервалі  $[-m_s; +m_s]$ , де  $m_s$  – похибка вимірювання довжин ліній. Модельні довжини ліній визначали з виразу

$$S_{\text{вим}}^I = S_{\text{іст}}^I + \Delta S^I. \quad (3)$$

Для визначення вимірних координат пунктів у першому циклі ( $X^I; Y^I$ ) врівноважили мережу параметричним методом. За вимірними координатами ( $X^I; Y^I$ ) та координатами нульового циклу ( $X^0; Y^0$ ) обчислили зміщення пунктів між першим і нульовим циклами спостережень ( $vX_{\text{вим}}^I; vY_{\text{вим}}^I$ ):

$$vX_{\text{вим}}^I = X^I - X^0; vY_{\text{вим}}^I = Y^I - Y^0. \quad (4)$$

Показник надійності мережі  $P(\%)$  визначали з виразу

$$P(\%) = \frac{100}{n} \left[ \frac{\sum \text{sign}(v_{\text{іст}} - v_{\text{вим}})^2 + \sum \text{sign}(v_{\text{іст}} - v_{\text{вим}})}{2} \right], \quad (5)$$

де  $n$  – кількість пунктів у мережі;  $v_{\text{іст}}$  – модельні істинні зміщення пунктів;  $v_{\text{вим}}$  – обчислені зміщення пунктів; *sign* – функція, яка присвоює значення (+1) виразу ( $v_{\text{іст}} - v_{\text{вим}}$ ), якщо вираз додатний, значення 0 (нуль), якщо вираз дорівнює нулю, і значення (-1), якщо вираз від'ємний.

Геометрична форма і схема вимірювань у мережі описується коваріаційною матрицею, яку характеризують значення критеріїв:

*A*-критерій ( $A = Sp(Q)$ , де  $Sp(Q)$  – слід коваріаційної матриці);

*D*-критерій ( $D = \det(Q)$ , де  $\det(Q)$  – визначник коваріаційної матриці);

*E*-критерій ( $E = \lambda_{\text{max}}$ , де  $\lambda_{\text{max}}$  – максимальне власне число коваріаційної матриці);

*I*-критерій ( $I = \lambda_{\text{max}} / \lambda_{\text{min}}$ , де  $\lambda_{\text{max}}, \lambda_{\text{min}}$  – відповідно максимальне і мінімальне власне число коваріаційної матриці).

Щоб встановити можливі залежності між геометричною формою та надійністю  $P(\%)$  для всіх моделей мереж, було визначено критерії *A*, *D*, *E*, *I*. Алгоритм складено таким чином, аби дослідження можна було виконувати в мережах з будь-якою кількістю пунктів та циклів спостережень.

Досліджувалися мережі з кількістю пунктів 4-6, 8, 10, 12, 14, 16 і 18. Для кожного варіанту було підготовлено моделі 40-ка мереж з різною геометричною формою. В кожній мережі моделювалося по 100 циклів спостережень. Значення критеріїв *A*, *D*, *E*, *I* не залежить від довжин ліній, тому в дослідженні використовувалася регресійна залежність:  $m_s = 1,5 + 2ppm$ .

Оскільки дослідження проводилося для мереж з різною кількістю пунктів, тому використовувалися нормовані значення критеріїв *A* та *D*. Критерії *E* та *I* не залежать від кількості пунктів, тому їх значення не нормували:

$$A^{\text{норм}} = \frac{A}{(n-2)}; D^{\text{норм}} = \frac{n-2}{\sqrt{D}}, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість пунктів у мережі.

Для всіх мереж та моделей вимірювань були визначені критерії *A*, *D*, *E*, *I*, а також надійність  $P(\%)$ . Для прикладу в табл. 1 та на мал. 4 наведено результати опрацювання частини модельних мереж різної геометричної форми з 6-ти пунктів при зміщеннях у межах геометричної точності мережі.

Дані з табл. 1 графічно відображено на мал. 4.

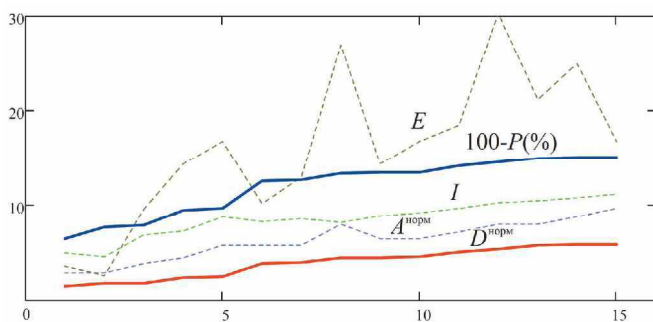
На мал. 4 можна побачити, що найчіткіше проявляється взаємозв'язок між  $P(\%)$  та *D*. Для підтвердження можливої залежності між значеннями критеріїв *A*, *D*, *E*, *I* та значенням  $P(\%)$  на основі даних 36 000 опрацьованих мереж було обчислено коефіцієнти кореляції (табл. 2).

Проаналізувавши табл. 2, можна стверджувати, що надійність мережі  $P(\%)$  має високу ступінь кореляції з *D*-критерієм і значно нижчу з рештою



Таблиця 1. Результати опрацювання мереж

| Мережа | $A^{норм}$ | $D^{норм}$ | $E$  | $I$  | $P(\%)$ |
|--------|------------|------------|------|------|---------|
| 1      | 2,9        | 1,5        | 3,6  | 5,0  | 93,5    |
| 2      | 2,9        | 1,8        | 2,6  | 4,6  | 92,3    |
| 3      | 3,9        | 1,8        | 9,6  | 6,9  | 92,1    |
| 4      | 4,5        | 2,4        | 14,4 | 7,3  | 90,5    |
| 5      | 5,8        | 2,5        | 16,8 | 8,8  | 90,3    |
| 6      | 5,8        | 3,9        | 10,2 | 8,3  | 87,4    |
| 7      | 5,8        | 4,0        | 13,0 | 8,6  | 87,3    |
| 8      | 8,0        | 4,5        | 27,0 | 8,2  | 86,6    |
| 9      | 6,5        | 4,5        | 14,4 | 8,9  | 86,5    |
| 10     | 6,5        | 4,6        | 16,8 | 9,2  | 86,5    |
| 11     | 7,2        | 5,1        | 18,5 | 9,7  | 85,8    |
| 12     | 8,0        | 5,4        | 30,3 | 10,3 | 85,4    |
| 13     | 8,0        | 5,8        | 21,2 | 10,5 | 85,0    |
| 14     | 8,8        | 5,9        | 25,0 | 10,8 | 84,9    |
| 15     | 9,7        | 5,9        | 16,8 | 11,2 | 84,9    |



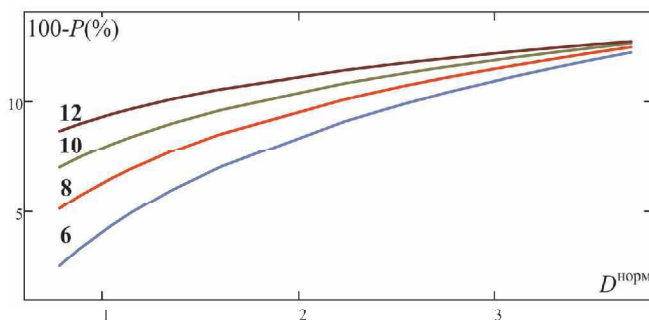
Мал. 4. Графічне відображення даних табл. 1

критеріїв. У зв'язку з цим  $D$ -критерій може бути використаний для апіорного визначення надійності мережі.

Щоб установити функціональні залежності між значеннями  $P(\%)$  та  $D^{норм}$  було побудовано графіки (мал. 5).

Таблиця 2. Коефіцієнти кореляції

| Величини, які порівнюються |                   | Межі коефіцієнтів кореляції |
|----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| A-критерій                 | 100- <i>P</i> (%) | 0,44 – 0,73                 |
| D-критерій                 |                   | 0,88 – 0,97                 |
| E-критерій                 |                   | 0,44 – 0,59                 |
| I- критерій                |                   | 0,35 – 0,68                 |

Мал. 5. Залежність між  $P(\%)$  та  $D^{норм}$  для мереж з 6, 8, 10 та 12-ти пунктів

Співвідношення між  $P(\%)$  та  $D^{норм}$ , представлене на мал. 5, у загальному вигляді можна описати з допомогою логарифмічної функції:

$$P(\%) = 100\% - (a + b \cdot \ln(D^{норм})), \quad (7)$$

де  $P(\%)$  – надійність мережі;  $D^{норм}$  – нормований детермінант коваріаційної матриці;  $a, b$  – невідомі коефіцієнти.

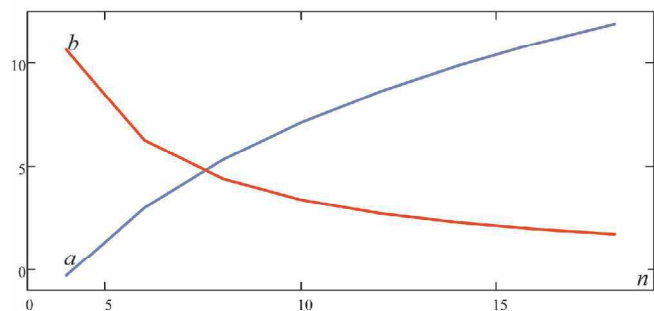
Для аналізу отриманих кривих було виконано апроксимацію коефіцієнтів  $a$  і  $b$ . Коефіцієнти визначалися для двох варіантів: 1) зміщення пунктів у межах геометричної точності мережі; 2) зміщення пунктів більші за геометричну точність мережі. Результати зведено в табл. 3.

Таблиця 3. Коефіцієнти  $a$  та  $b$  і середні квадратичні похибки їх визначення

| Кількість пунктів у мережі | Зміщення пунктів у межах точності мережі |       |      |       | Зміщення пунктів поза межами точності мережі |       |      |       |
|----------------------------|--|-------|------|-------|--|-------|------|-------|
|                            | $a$                                      | $m_a$ | $b$  | $m_b$ | $a$  | $m_a$ | $b$  | $m_b$ |
| 4                          | -1,8                                     | 0,2   | 10,6 | 0,6   | -1,7   | 0,2   | 10,6 | 0,6   |
| 5                          | 1,3                                      | 0,1   | 8,6  | 0,5   | 1,3  | 0,1   | 8,7  | 0,5   |
| 6                          | 4,1                                      | 0,3   | 6,2  | 0,3   | 4,2  | 0,3   | 6,2  | 0,3   |
| 8                          | 6,3                                      | 0,3   | 4,7  | 0,2   | 6,3  | 0,3   | 4,7  | 0,3   |
| 10                         | 7,9                                      | 0,4   | 3,6  | 0,2   | 7,9  | 0,4   | 3,6  | 0,2   |
| 12                         | 9,3                                      | 0,5   | 2,6  | 0,1   | 9,3  | 0,5   | 2,5  | 0,1   |
| 14                         | 10,1                                     | 0,6   | 2,1  | 0,1   | 10,1   | 0,6   | 2,1  | 0,1   |
| 16                         | 10,6                                     | 0,6   | 1,8  | 0,1   | 10,5   | 0,6   | 1,8  | 0,1   |
| 18                         | 10,9                                     | 0,6   | 1,7  | 0,1   | 10,8   | 0,6   | 1,7  | 0,1   |

Проаналізувавши табл. 3 і мал. 5, можна зробити висновок, що коефіцієнти  $a$  і  $b$  залежать від кількості пунктів у мережі. У зв'язку з цим необхідно встановити функціональну залежність між кількістю пунктів у мережі та значеннями коефіцієнтів  $a$  і  $b$ .

Для цього було побудовано графіки залежності (мал. 6).

Мал. 6. Залежність значень коефіцієнтів  $a$  і  $b$  від кількості пунктів у мережі

За виглядом кривих на мал. 6 можна зробити висновок, що коефіцієнт  $a$  зростає за логарифмічною, а коефіцієнт  $b$  спадає за степеневими функціями типу:

$$\begin{aligned} a(n) &= c + d \cdot \ln(n); \\ b(n) &= \frac{e}{n} + \frac{f}{n^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $n$  – кількість пунктів у мережі;  $c, d, e, f$  – невідомі коефіцієнти.

Виконаємо апроксимацію для функціонального відображення кривих, поданих на мал. 6. Одержані значення коефіцієнтів  $c, d, e, f$  підставляємо у вирази (8):





1) для мереж зі зміщенням пунктів у межах їх геометричної точності:

$$a = (-11,5 \pm 0,5) + (8,1 \pm 0,8) \cdot \ln(n), \text{ при } m_a = 0,15;$$

$$b = \frac{(28 \pm 1,5)}{n} + \frac{(58 \pm 7,7)}{n^2}, \text{ при } m_b = 0,22; \quad (9)$$

2) для мереж зі зміщенням пунктів, більших за їх геометричну точність:

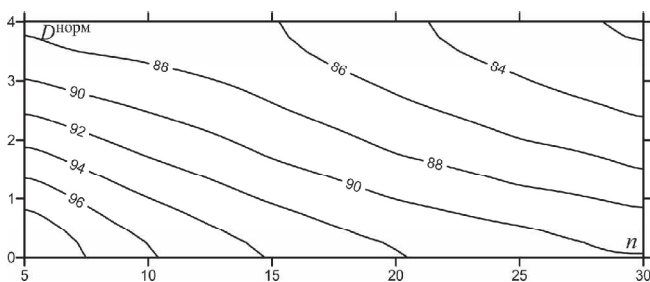
$$a = (-11,4 \pm 0,5) + (8,1 \pm 0,8) \cdot \ln(n), \text{ при } m_a = 0,25;$$

$$b = \frac{(28 \pm 1,5)}{n} + \frac{(58 \pm 7,6)}{n^2}, \text{ при } m_b = 0,20; \quad (10)$$

Проаналізувавши одержані коефіцієнти, можна стверджувати, що для обох випадків їх значення практично однакові. Тож, узагальнивши вирази (9) та (10) та підставивши їх у (7), одержимо:

$$P(\%) = 100\% - \left[ \left[ (-11,5 \pm 0,5) + (8,1 \pm 0,8) \cdot \ln(n) \right] + \left[ \frac{(28 \pm 1,5)}{n} + \frac{(58 \pm 7,7)}{n^2} \right] \cdot \ln(D^{\text{норм}}) \right]. \quad (11)$$

Функція (11) описує залежність надійності мережі  $P(\%)$  від нормованого значення детермінанта коваріаційної матриці та кількості пунктів у мережі. Для прикладу подамо цю функцію у вигляді номограми (мал.7).



Мал. 7. Номограма залежності  $P(\%)$  від  $D^{\text{норм}}$  та  $n$

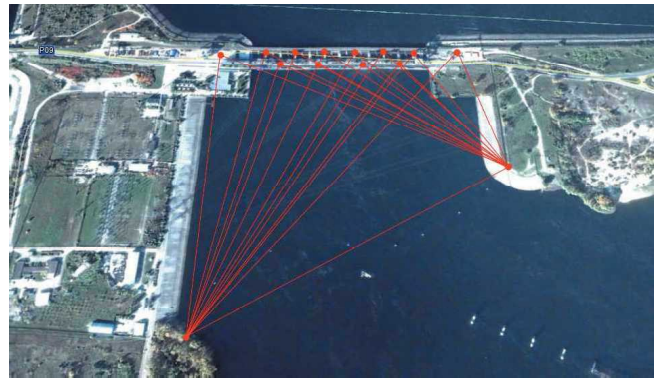
Для виявлення залежності між надійністю мережі та детермінантом коваріаційної матриці ( $D$ -критерієм) підставимо (6) в (11):

$$P(\%) = 100\% - \left[ \left[ (-11,5 \pm 0,5) + (8,1 \pm 0,8) \cdot \ln(n) \right] + \left[ \frac{(28 \pm 1,5)}{n} + \frac{(58 \pm 7,7)}{n^2} \right] \cdot \ln(n^2 \sqrt{D}) \right]. \quad (12)$$

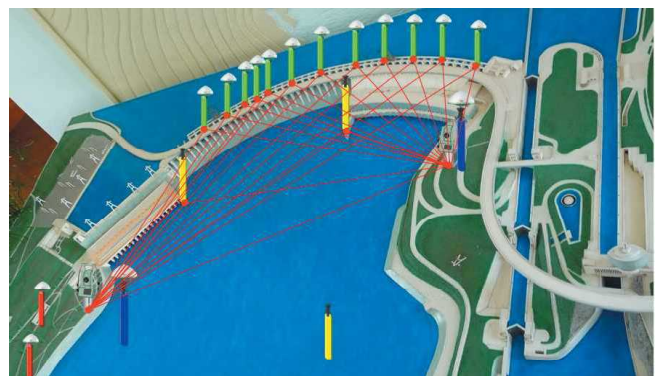
Точність визначення  $P(\%)$  коливається в межах 0,1-0,3 %. Мереж із значенням надійності менше за 73 % не виявлено. Вивчивши результати проведених досліджень, можна стверджувати, що чим більше значення  $P(\%)$ , тим надійніша мережа.

Встановлено надійність АМГМ Канівської (мал. 8) та Дніпровської (мал. 9) ГЕС, обраних для проведення безперервного геодезичного моніторингу в режимі реального часу з застосуванням автоматизованих систем моніторингу деформацій.

У результаті проведених досліджень виявлено, що для АМГМ Канівської ГЕС при значенні  $D^{\text{норм}}=0,051$  надійність  $P(\%)$  дорівнює 97,1 %, а для Дніпровської при  $D^{\text{норм}}=0,026$  вона становить 95,3 %.



Мал. 8. Мережа Канівської ГЕС



Мал. 9. Мережа Дніпровської ГЕС

Тобто зі 100 серій вимірювань на обох ГЕС відповідно 3 і 5 % недостовірних даних. Для кращої надійності необхідно оптимізувати геометричну форму геодезичних мереж.

**Висновки.** Проведено дослідження активної моніторингової геодезичної мережі (АМГМ). Встановлено функціональну залежність між надійністю  $P(\%)$  та геометричною формою мережі, а саме функцію залежності  $P(\%)$  від детермінанта коваріаційної матриці ( $D$ -критерію) та кількості пунктів у мережі  $n$ . Точність визначення надійності мережі із застосуванням даної функціональної залежності становить 0,1-0,3 %.

Визначено надійність АМГМ Канівської та Дніпровської ГЕС. Для першої вона дорівнює приблизно 97 %, а для другої понад 95 %.

**Перспективи подальших досліджень.** Оскільки опрацьовано дані лише для лінійних АМГМ при умові, що виміряно довжини всіх можливих ліній, тому необхідно ще дослідити функціональну залежність між надійністю та геометричною формою мережі з неповною схемою вимірювань, а також для лінійно-кутових АМГМ.

## Література

1. Васілевський, О.М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О.М. Васілевський, В.О. Поджаренко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.



2. Евстафьев, О.В. Современные технологии геодезического деформационного мониторинга – опыт применения / О.В. Евстафьев. – М.: Фирма "Г.Ф.К.", 2010. – 32 с.
3. Могильный, С.Г. Трикоординатный вимірювальний комплекс "Визир-3D" / С.Г. Могильний, А.А. Шоломицький, Є.І. Шморгун: наук. пр. ДонНТУ: Сер. гірничо-геологічна. – Вип. 9. – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 13-25.
4. Могильный, С.Г. Измерительный комплекс "Визир-3D" на предприятиях Украины: геодезический контроль и выверка технологического оборудования / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, В.Н. Ревуцкий, В.А. Пригаров // Геопрофиль. – 2009. – № 3. – С. 12-19.
5. Могильный, С.Г. Автоматизированная система геодезического мониторинга / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, Е.И. Шморгун // Суч. досягн. геодез. науки та вир-ва. – 2010. – Вип. I. – С. 193-197.
6. Craenenbroeck, J.v. Engineering Structures First International FIG Workshop. – Hong Kong / J.v. Craenenbroeck // International Federation of Surveyors (FIG). – Belgium. – 2012. – P. 1-18.
7. Craenenbroeck, J.v. Driving Burj Dubai core walls with an advanced data-fusion system / J.v. Craenenbroeck, D. Mc L. Hayes, I. R. Sparks // 12th FIG Symposium. 22-24 May, 2006. – Baden. – P. 1-12.
8. Craenenbroeck, J.v. State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant / J.v. Craenenbroeck, A. Balan // Суч. досягн. геодез. науки та вир-ва. – 2012. – Вип. I. – С. 162-168.
9. Lambrou, E. Special marking of 3D networks points for the monitoring of modern constructions / E. Lambrou, G. Pantazis, K. Nikolitsas // 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis; 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering. 12-15 May, 2008. – Lisbon, Portugal. – P. 1-10.
10. Rizos, C. Advances in GNSS-RTK for Structural Monitoring in Regions of High Ionospheric Activity. Deformation Measurement of Structures Using GNSS // C. Rizos, J.v. Craenenbroeck, V. Liu // FIG Congress 2010. Facing the Challenges – Building the Capacity. 11-16 April, 2010. – Sydney, Australia. – P. 1-13.
11. ПАТ "Укрідроенерго" // Співпраця із Світовим банком. – Реж. доступу: [www.uge.gov.ua](http://www.uge.gov.ua). – 20.01.2013.

#### Інтернет-джерело

Надійшла 29.01.13

\* \* \*

УДК 528.3:551.5

В. О. Літинський, С. С. Перій, В. О. Сухоруков

### ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВОСТОРОННЬОГО ТРИГОНОМЕТРИЧНОГО НІВЕЛЮВАННЯ

Описывается новый способ двухстороннего тригонометрического нивелирования, который позволяет не измерять высоту приборов и отражателей. Проведена апробация способа и его анализ. Доказано, что двухсторонним тригонометрическим нивелированием можно заменить геометрическое нивелирование III класса.

*It is described a new method of double sided trigonometric leveling, that allows not to measure the height of appliances and reflectors. The testing of the method and its analysis are carried out. It is proved that double sided trigonometric leveling can substitute geometrical leveling of the third class.*

**Постановка проблеми.** Метод тригонометричного нівелювання економічно ефективніший, ніж метод геометричного нівелювання. Однак тригонометричне нівелювання менш точне. Тому висотні мережі згущення для великомасштабного знімання та інженерних робіт створюють в основному методом трудомісткого геометричного нівелювання.

Електронні тахеометри дали змогу суттєво спростити деякі процеси геодезичних вимірювань, підвищити їх точність. Супутникові технології не завжди можуть забезпечити необхідну точність, час і місце виконання робіт. Проблема ще й у тому, як, використовуючи один і той же прилад (електронний тахеометр), створювати висотну і планову основи, виконувати електронне топографічне знімання. Крім цього, на точність визначення переви-

щень у тригонометричному нівелюванні значний вплив має вертикальна рефракція.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автори праць [1, 2], проаналізувавши вплив вертикальної рефракції на результати тригонометричного нівелювання, дали детальні рекомендації щодо зменшення цього впливу завдяки вдалому вибору найвигіднішого часу для вимірювань вертикальних кутів, виконання неодноразових і одночасних двосторонніх вимірювань, застосування локальних значень коефіцієнтів вертикальної рефракції, виконання вимірювань у моменти встановлення нейтрального стану стратифікації атмосфери, застосування статистичних моделей параметрів приземного шару повітря, використанню високих штативів, зменшення довжин трас тощо.

Інструкція [4] не пропонує методики для врахування вертикальної рефракції у тригонометричному нівелюванні, яке використовують для створення

© В. О. Літинський, С. С. Перій,  
В. О. Сухоруков, 2013