УДК 528.31/.48

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ СПЕЦІАЛЬНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕРЕЖ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННЯХ ЗА ІНЖЕНЕРНИМИ СПОРУДАМИ

THE METHODOLOGY OF SPECIAL GEODETIC NETWORKS STABILITY STUDY FOR OBSERVATION OF ENGINEERING STRUCTURES

Шостак А.В., д.т.н., доцент (СНУ ім. Л.Українки, м. Луцьк), Мельник О.В., к.т.н., доцент (СНУ ім. Л.Українки, м. Луцьк), Мельник Ю.А. к.т.н., доцент (Луцький НТУ, м. Луцьк), Боб А.Ю. (СНУ ім. Л.Українки, м. Луцьк, Магістр)

Shostak A.V. Doctor of Technical Sciences, Docent (Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk), Melnyk O.V. Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent (Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk), Melnyk Y.A. Candidate of Technical Sciences (PhD) (Lutsk National Technical University, Lutsk), Bob A.Y. (Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk, Master student)

В статті розглядається питання оцінки стабільності планових геодезичних мереж при спостереженнях за гідротехнічними спорудами. В основу пропонованої методики покладено аналіз деформації геометрії мережі схожий на аналіз деформації у твердому тілі, яка визначається через розширення, поворот і нахил.

The evaluation of the stability of planned geodetic networks during observations of hydraulic engineering structures is considered. The basis of the proposed methodology on the analysis of the geometry of deformation network is similar to the analysis of deformation in a solid, which is determined by the extension, rotation and skewing. The proposed alternative approach to studying and analyzing the reliability and stability of planned geodetic networks allowed to obtain quite representative results that correlate well with the results of classical GNSS observations, which testifies to the expediency of their use and allows obtaining operational information about the studied deformation processes.

Ключові слова: планові геодезичні мережі, стабільність мережі, вектори зсувів, стійкість до масштабу, диференціальне обертання, скалярна деформація.

Keywords: planned geodetic networks, network stability, vector of landslides, stability to scale, differential rotation, scalar deformation.

Ґрунтові греблі за рівнем складності розвитку в них деформаційних процесів та ступенем аварійності мають у декілька разів вищий порядок, ніж будь-яка гідротехнічна споруда іншого типу. Для надійної оцінки просторово-часового стану таких об’єктів необхідно виконувати комплексні режимні геодезичні спостереження. На основі таких даних оцінюються різні параметри і явища, що спричиняють процеси деформацій, в тому числі і аварійних. Проте, окрім комплексних спостережень, важливими є питання швидкої оцінки загального стану мережі, особливо якщо це мережа спеціального призначення. В статті розглядається питання оперативного визначення ступеня стабільності планової геодезичної мережі призначеної для спостережень за деформаційними процесами ґрунтової греблі.

Питання оцінки стабільності геодезичних мереж неодноразово піднімалось в різного роду літературі [1,2,3,4] і ґрунтуються, в основному, на контролі окремих вихідних пунктів. Проте, питання одержання оперативної інформації про стан мереж спеціального призначення, які застосовуються для контролю за гідротехнічними об`єктами, особливо в періоди зміни гідрологічного стану, мало вивчені.

Щоб мати можливість визначити ступінь стабільності геодезичної мережі, необхідно дослідити ступінь деформації, якої зазнає мережа. Одним з найпростіших способів для опису ступеня деформації є визначення індивідуальних зсувів кожної із точок, з яких складається мережа. Відомо, що при вирівнюванні геодезичних мереж, можна записати існуючий вираз [5]:

$$\hat{X} = X^{(0)} + \delta\hat{X} = (A^T PA)^{-1} A^T P[l - F(X^{(0)})], \qquad (1)$$

де $\hat{X}$ — вектор шуканих невідомих; $X^{(0)}$ — вектор початкових значень кожного з параметрів, що потрібно визначити; $\delta\hat{X}$ — вектор поправок наближених значень; A — матриця коефіцієнтів параметричних рівнянь поправок; P - вагова матриця; $[(l-F(X^{(0)})]$ — вектор-стовпець вільних членів рівнянь поправок.

Різниця у визначенні параметрів, не беручи до уваги мінімально виявлені помилки, може бути записана як

$$\delta = \hat{X} - \hat{X}^{(K)}. \tag{2}$$

Звідси отрмаємо значення $\hat{X}^{(K)}$ яке може бути виражене як функція мінімально визначених помилок $\delta_{\min}^{(k)}$ (внутрішня надійність). Так, враховуючи (1), маємо

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(k)} &= N^{-1}A^T P(L-\delta_{\min}^k); \\ \hat{X}^{(k)} &= N^{-1}A^T PL - N^{-1}A^T P\delta_{\min}^k; \\ \hat{X}^{(k)} &= \hat{X} - N^{-1}A^T P\delta_{\min}^k. \end{aligned} \tag{3}$$

Підставляючи (3) в (2), отримаємо визначення зовнішньої надійності для вимірів за допомогою супутникової GNSS-технології [6,7]:

$$\begin{aligned} \delta &= \hat{X} - \hat{X}^{(k)}; \\ \delta &= \hat{X} - \hat{X}^{(k)} = N^{-1}A^T P\delta_{\min}^k. \end{aligned} \tag{4}$$

Аналіз концепції деформації в геометрії мережі схожий на аналіз деформації у твердому тілі, яка визначається як відношення або пропорція зміни (градієнта) зсуву об'єкта щодо свого положення.

Припустимо, що точка мережі Pi має горизонтальний зсув, виражений в термінах внутрішньої надійності через наступний вектор ΔX_i:

$$\Delta X_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix}. \tag{5}$$

Необхідно відзначити, що стійкість розглядається тільки в горизонтальній системі, тим самим для GNSS вимірів необхідно трансформувати вектор зсувів (4) із просторової в горизонтальну систему, використовуючи матрицю повороту, що задається як

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix}. \quad (6)$$

де φ, λ — геодезичні координати, визначені на досліджуваній ділянці. Ця матриця переводить вплив мінімально отриманих помилок для вимірів GNSS із просторової в локальну систему. Тим самим шуканий вектор зсувів являє собою

$$R\delta = R[\hat{X} - \hat{X}^{(k)}];$$
$$R\delta = R[N^{-1}A^T PH_K \delta_{\min}^k]. \quad (7).$$

Вводячи визначення матриці зсувів E, як тензора градієнта стосовно його початкового положення, можна визначити матрицю, що складається із чотирьох лінійних зсувів як [8,9]:

$$E_i = grad(\Delta X_i) = \begin{bmatrix} \partial u_i / \partial x & \partial u_i / \partial y \\ \partial v_i / \partial x & \partial v_i / \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{ux} & e_{uy} \\ e_{vx} & e_{vy} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де ΔX_i — вектор зсувів точки *Pi*; *Ei* — матриця деформацій у точці *Pi*.

У точці *Pi* проводиться визначення чотирьох похідних. Матриця деформацій *Ei* може бути представлена у вигляді симетричної *S* і антисиметричної *A* частин. Симетрична частина відповідає за розширення і стиск мережі, а також за зсув, тоді як антисиметрична частина описує поворот точки ω, яка і цікавить нас :

$$E_i = S + A, \quad (9)$$

Градієнт локального зсуву оцінюється незалежно для кожної координати. Для аналізу стійкості необхідно встановити, що для кожної з аналізованих точок *Pi* існують, принаймні, дві сусідні точки *Pj*, а в противному випадку аналіз не є повним (закінченим).

Матриці деформацій (8) можуть визначатися різними способами незалежно для кожної точки інтересу. Пропонується застосовувати метод прямого знаходження частинних похідних зсувів, отриманих з вектора (5).

$$S = \begin{bmatrix} \partial u_i / \partial x & \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial y + \partial v_i / \partial x) \\ \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial y + \partial v_i / \partial x) & \partial v_i / uy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial y + \partial v_i / \partial x) \\ \frac{1}{2}(\partial v_i / \partial x + \partial u_i / \partial y) & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}.$$

Отримана система рівнянь може бути вирішена методом найменших квадратів. Вирішуючи дану систему для невідомих частинних похідних і для незалежних параметрів і беручи до уваги, що параметри u, v мають однакову вагу, можна записати дану систему рівнянь у матричному виді, а саме для кожної точки (*Pi*) мережі:

$$K_i = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \left[(K_i^T K_i)^{-1} K_i^T \right] u_i = Q_i u_i;$$

$$K_i = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \left[(K_i^T K_i)^{-1} K_i^T \right] v_i = Q_i v_i; \tag{10}$$

Де $Q_i = (K_i^T K_i)^{-1} K_i^T$; Ki — матриця, розмірністю $n \times 3$, що має вигляд [$1xy$].

Після одержання значень [*a0 a1 a2*]*T* і значень [*b0 b1 b2*]*T* перепозначимо змінні як

$$e_{ux} = a_1 \quad e_{uy} = a_2$$
$$e_{vx} = b_1 \quad e_{vy} = b_2 \tag{11}$$

Тепер три параметри, що визначають стійкість мережі, визначені через розширення, поворот і нахил:

– розширення σ. Цей елемент описує середнє розширення точки мережі, він також відомий як стійкість до масштабу і визначається як

$$\sigma = \frac{e_{ux} + e_{vy}}{2}; \tag{12}$$

– диференціальне обертання ωz. Цей елемент відомий як середнє значення диференціального обертання. Описує обертання через локальну вертикальну вісь точки. Також відомий як показник стійкості до повороту і задається як

$$\omega_z = \frac{e_{uy} - e_{vx}}{2}; \tag{13}$$

– локальна конфігурація (повний зсув) γ_{xy}. Цей елемент описує скалярну деформацію (стійкість до конфігурації) і визначається по наступній формулі:

$$\gamma_{xy} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + v_{xy}^2}, \tag{14}$$

де

$$\tau_{xy} = -\tau_{yx} = \frac{1}{2}(e_{ux} - e_{vy});$$

$$v_{xy} = -v_{yx} = \frac{1}{2}(e_{uy} + e_{vx}).$$

Значення трьох параметрів, обчислені по формулах (12-14), що і характеризують стійкість мережі, показані в табл. 1.

Таблиця 1.

Результати обчислення стабільності планової мережі греблі водосховища [1,2]

Пункт	Стійкість до масштабу, мм	Стійкість до повороту, мм	Стійкість до конфігурації, мм
ПП1	1.32	1.44	1.96
ПП3	1.28	1.39	1.89
ПП19	1.25	1.24	1.87
ПП32	1.24	1.21	1.86
ПП34	1.27	1.27	1.89
Мз27	1.41	1.39	2.02
Мз31	1.46	1.45	2.13
Сер. знач.	1.29	1.16	1.90

Слід відзначити, що найбільше значення кожного з параметрів відповідає найменшій стійкості мережі в даній точці. Тому у випадку стійкої мережі необхідно добитися відносно невеликих значень по цих трьом показникам.

Висновки: Запропонований в статті альтернативний підхід до вивчення і аналізу надійності та стійкості планових геодезичних мереж дозволив отримати достатньо репрезентативні результати які добре корелюють із результатами класичних GPS спостережень, що свідчить про доцільність їх використання та дозволяє отримувати оперативну інформацію про досліджувані деформаційні процеси. Вивчення такого підходу є предметом майбутніх досліджень.

1. Мельник О.В. Адаптивний алгоритм оперативного GPS-геодезичного контролю /Мельник О.В. // Зб. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. -Львів,-2011. -вип.21. С.101-102.
2. Мельник О.В. Варіант оперативного геодезичного контролю за експлуатаційним станом греблі ХАЕС / Мельник В.М., Мельник О.В. // Зб. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. -Львів,-2009. -вип.17. С.178-186.
3. Nilforoushani F. GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran /Nilforoushani F., Masson F., Vemant P., Vigny C, Abbassis M., Nankali H., and oth..//Springer Berlin. Heidelberg. Journal of Geodesy, 2003, 77: 411-422p.
4. Гуляев Ю. П. Классификация и взаимосвязь математических моделей для прогнозирования процессов деформации сооружений по геодезическим данным / Ю. П. Гуляев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 1985. - № 1. - С. 39-44.
5. Маркузе Ю.И. Обобщенный рекуррентный алгоритм уравнивания свободных и несвободных геодезических сетей с локализацией грубых ошибок / Ю.И. Маркузе //Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2000. №1. С. 3—16
6. Kyle Brian Snow. Applications of Parameter Estimation and Hypothesis Testing GPS Network Adjustments./ Kyle Brian Snow // Report No. 465. The Ohio State University (2002). Geodetic and Geoinformation Science.
7. G.Even-Tzur. GPS vector configuration design for monitoring deformation network./ Even-Tzur. // Springer Berlin Heidelberg. Journal of Geodesy (2002) 76 455-461.
8. P.Vanicek. Robustness analysis of geodetic horizontal networks. / P.Vanicek, M.R.Craymer, E.J. Krakiwsky // Springer Berlin /Heidelberg. Journal of Geodesy (2001) 75: 199-209.
9. R.Hsu. Decomposition of deformation primitives of horizontal geodetic networks: Applications to Taiwan's GPS network. /R.Hsu, S.Li // Springer Berlin Heidelberg. Journal of Geodesy (2004) 78: 251-262.