

С.П.Войтенко, *д-р техн. наук, професор,*
зав. кафедри інженерної геодезії
Київський національний університет будівництва і архітектури

ІМОВІРНІСНО-СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ОСІДАНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Сучасні методи ймовірно-статистичного аналізу дають широкі можливості підвищення інформаційності геодезичних спостережень за осіданням та деформаціями інженерних споруд. В статті використано моделювання процесу осідання споруд із застосуванням теорії довірчих інтервалів, кореляційного аналізу, що сприяє підвищенню якості результатів досліджень інженерних споруд і дає змогу розробити надійні конструктивні заходи для посилення конструкцій, підвищити надійність та довговічність їх експлуатації.

Ключові слова: *осідання, матриця, кореляційний момент, коефіцієнт кореляції, функція, довірчий інтервал.*

Вступ. Дослідження осідань інженерних споруд виконують як на стадії зведення, так і в період експлуатації, коли виявлено ознаки деформації.

Для визначення величини осідання та його прогнозування виконують точні геодезичні спостереження за його розвитком.

Достатньо фахово в літературі розглянуто питання статистичного оброблення результатів геодезичних спостережень за стабільністю вихідних реперів [2] і станом окремих марок, закріплених на споруді. Важливо на сучасному етапі запропонувати методику ймовірно-статистичного аналізу сумісного стану осідальних марок, закріплених на інженерній споруді. Для прийняття конструктивних рішень щодо усунення причин деформації споруди важливо знати стан основних вузлів конструкції, на яких закріплюють осідальні (деформаційні) марки, їх взаємодію між собою та надійний прогнозний характер осідання споруди.

Сучасний апарат теоретико-ймовірного аналізу осідань дає змогу підвищити інформаційну віддачу результатів геодезичних вимірювань осідань і деформацій споруди.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження осідань і деформацій інженерних споруд виконувало багато вчених протягом ХХ століття: Г.К. Ботан, П.І. Брайт, М.Г. Відуєв, В.С. Староверов, Д.М. Міхелев, В.І. Рунов, А.І. Голубцов, Г.П. Левчук, В.Е. Новак, А.Ф. Стороженко та інші.

Достатньо повно розроблено положення проектування геодезичних мереж, конструкції геодезичних знаків вихідної мережі та деформаційних знаків, методи геодезичних спостережень [1; 2; 4].

Дослідники застосовували методи математичної статистики для оброблення результатів вимірювань. Досліджували розподіл рядів вимірів, їх

рівноточність, вплив систематичних похибок і кореляційний аналіз між результатами вимірювання у циклах.

Проф. М.Г. Відуєв та В.С. Староверов велику увагу приділили визначенню необхідної і достатньої точності вимірів, визначенню швидкості деформацій і періодичності вимірювань, визначенню прогнозних характеристик та їх надійності.

Постановка завдання. Мета полягає в тому, щоби запропонувати математичні методи комплексного дослідження осідань споруди за результатами системи закріплених марок, зокрема визначити їх взаємозв'язок, нерівномірне осідання окремих марок, прогнозні характеристики деформацій споруди із застосуванням теорії довірчих інтервалів. Це сприятиме підвищенню якості дослідження деформацій споруди, прийняттю надійних конструктивних рішень для усунення можливих в подальшому осідань і деформацій споруди.

Основна частина. Одним з важливих показників деформаційного процесу є визначення числових характеристик прогнозної моделі осідання інженерних споруд.

Сучасні методи ймовірно-статистичного аналізу результатів геодезичних вимірювань дають змогу отримати важливу достовірну інформацію про параметри осідань та їх розвиток в процесі експлуатації споруди.

Для дослідження осідань фундаментів будинків і споруд поблизу них поза зоною деформації ґрунту закладають один або більше куштів глибинних реперів. На споруді закладають k -марок, положення яких по висоті визначають від глибинних реперів зазвичай високоточним геометричним нівелюванням через певні інтервали, які називають n - циклами вимірювань.

За результатами по k -марках в кожному циклі визначають висоту кожної марки. Отримують матрицю:

$$\begin{pmatrix} H_1^0 & H_2^0 & \dots & H_k^0 \\ H_1^1 & H_2^1 & \dots & H_k^1 \\ H_1^2 & H_2^2 & \dots & H_k^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_1^n & H_2^n & \dots & H_k^n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де H_i^0 – висота марки нульового циклу;

H_i^j – висота марки в j -му циклі $\left(i = \overrightarrow{1, k} \right), \left(j = \overrightarrow{1, n} \right)$.

Під час статистичного аналізу, обчислимо величину осідання кожної i -ї марки в j -му циклі відносно нульового циклу:

$$h_{ij} = H_i^0 - H_i^j. \quad (2)$$

Отримаємо матрицю осідань марок, яка поступово нарощується в міру збільшення циклів вимірювань:

$$\left. \begin{matrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1k} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nk} \end{matrix} \right\}, \quad \begin{matrix} M(h_1); & m_1^2 \\ M(h_2); & m_2^2 \\ \dots & \dots \\ M(h_n); & m_n^2 \end{matrix} . \quad (3)$$

Обчислимо:

1) математичне сподівання κ -марок споруди поступово в кожному циклі

$$M(h_i) = \frac{\sum_i^k h_{ij}}{K} = \bar{h}_i, \quad (4)$$

де i – номер марки; j – номер циклу спостережень;

2) дисперсію фактора осідання (деформації) в кожному наступному циклі:

$$m_j^2 = \frac{\sum_i^k v_{ij}^2}{k-1}, \quad (5)$$

де $v_{ij} = h_{ij} - \bar{h}_i$. (6)

3) послідовні різниці осідань між суміжними марками в кожному циклі вимірювань:

$$d_{ij} = h_{i+1, j} - h_{ij}; \quad \left(i = \overset{\rightarrow}{1, k} \right), \quad \left(j = \overset{\rightarrow}{1, n} \right); \quad (7)$$

4) дисперсію послідовних різниць після виконання кожного циклу вимірювань:

$$m_{d_j}^2 = \frac{[d_j^2]}{2(k-1)}. \quad (8)$$

Для кожного циклу за критерієм Аббе визначають статистику:

$$\delta_j = \frac{m_{d_j}^2}{m_j^2}; \quad \left(j = \overset{\rightarrow}{1, n} \right). \quad (9)$$

Гіпотеза про наявність осідання споруди в цілому або окремих її частин визначається критичною областю для кожного циклу вимірювань:

$$\delta_j > \delta_q. \quad (10)$$

Статистику δ_q визначають за табл. 5 [3] за рівнем значущості $q = 1 - p$ і кількістю вимірів за κ – реперами.

Наприклад, якщо $p = 0,99$ $q = 0,01$ і $\kappa = 6$, то за таблицею отримаємо $\delta_q = 0,28$, а за $q = 0,95$ ($q = 0,05$) $\delta_q = 0,44$.

Якщо $\delta_j < \delta_q$, відбувається рівномірне осідання споруди або осідання є несуттєвим.

Зазначимо, що фактор осідання між циклами можна визначити за величиною послідовних різниць між суміжними циклами d_i :

$$d_{ij} = h_{j+1,i} - h_{ji}. \quad (11)$$

Осідання марок між циклами зумовлено похибками вимірів (нівелювання) та величиною осідання марки.

Якщо послідовна різниця по кожній марці між суміжними циклами перевищує допустиму похибку $v_{гр}$ вимірювань, тобто $d_{ij} > v_{гр}$,

$$(12)$$

то можна стверджувати, що відбувається осідання окремих марок або всіх загалом, отже, й осідання споруди.

Для визначення граничної похибки нівелювання марок скористаємося положенням інструкції [4], згідно з яким визначати осідання фундаментів споруд треба з середньою квадратичною похибкою:

1) особливо відповідальних споруд та споруд, зведених на скельній основі

$$\text{I класу } m_h = \pm 1 \text{ мм};$$

2) для споруд зведених на ґрунтах, що стискаються,

$$\text{II класу } m_h = \pm 2 \text{ мм};$$

3) для споруд на насипних, просадкових і вічномерзлих ґрунтах

$$\text{III класу } m_h = \pm 5 \text{ мм}.$$

Граничні відхилення визначають за формулою:

$$\Delta_{гр} \leq t m_h, \quad (13)$$

де t – параметр, що визначають за таблицями функцій Лапласа [3] залежно від прийнятої довірчої ймовірності P . Відповідно отримуємо:

при $P = 0,99$ $t = 3$,

при $P = 0,95$ $t = 2,5$,

при $P = 0,90$ $t = 2$.

Відповідно граничні похибки послідовних різниць між суміжними циклами дорівнюватимуть

$$\Delta_I = 3 \cdot 1 = \pm 3 \text{ мм}; \quad \Delta_{II} = \pm 5 \text{ мм} \quad \text{і} \quad \Delta_{III} = \pm 10 \text{ мм}.$$

Висновки:

1) якщо d_{ij} поступово зменшується, то відбувається процес згасання осідання споруди;

2) якщо $\bar{h}_{j+1,i} - \bar{h}_{ji} \leq \Delta_{гр}$, то почався процес стабілізації осідань. Для контролю можна виконати ще один цикл вимірювань і дослідження припинити;

3) якщо $\bar{h}_{j+1,i} - \bar{h}_{ji} > \Delta_{гр}$, то спостерігається осідання споруд і спостережень не слід припиняти;

4) якщо в певному циклі вимірювань виявлено, що для деяких марок послідовні різниці d_{ij} більші за $\Delta_{гр}$ ($d_{ij} > \Delta_{гр}$), то відбувається нерівномірне осідання таких марок відносно інших.

Остаточню по завершенню досліджень можна отримати математичну модель процесу осідання споруди і скласти прогноз щодо подальшого розвитку осідань споруди.

Використаємо математичні сподівання осідання закріплених марок на фундаменті споруди в кожному циклі вимірювань $\overline{M}(t_i) = \overline{h}_i$, $(i = 1, k)$ і побудуємо графік (рис.1).

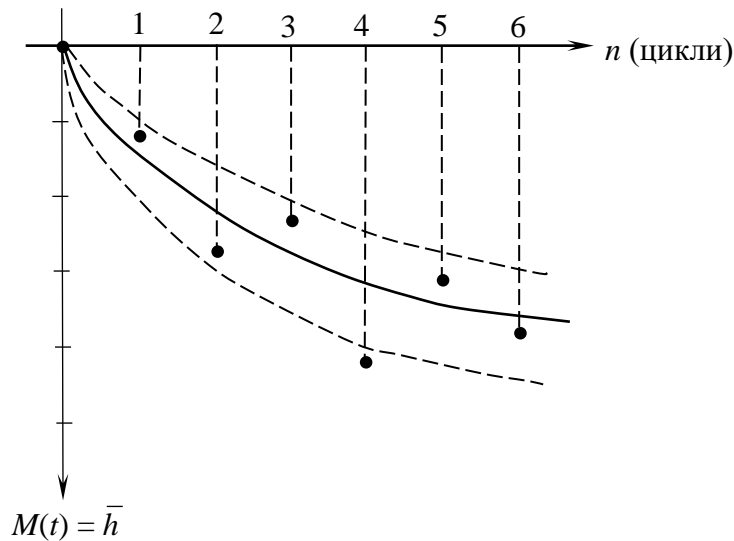


Рис.1. Графік осідань споруди

З вигляду графіка можна попередньо визначити математичну модель рівняння осідань споруди за формулами [3]:

- прямолінійної функції $y = K_1 + K_2x$;
- квадратичної функції $y = K_1 + K_2x + K_3x^2$;
- періодичної функції $y = K_1 + K_2 \sin x + K_3 \cos x$;
- логарифмічної та степеневій функцій $y = K \sin x$; $y = Ke^x$, або $y = e^{kx}$.

Найбільш доцільно виконувати параболічну апроксимацію за методом Чебишева [3], коли не зовсім явно графічно визначається вид функції за формулою:

$$y = K_1 + K_2x + K_3x^2 + \dots + K_nx^{n-1}. \tag{14}$$

Важливо встановити кореляційний зв'язок між суміжними марками: він характеризуватиме взаємний вплив осідання суміжних марок. Це дасть можливість ухвалити правильні конструктивні рішення щодо укріплення окремих частин споруди з метою усунення можливих деформацій споруди.

Для цього обчислюють кореляційні моменти:

$$\overline{K} \{ \overline{h}(t_i), \overline{h}(t_j) \} = \overline{K}(t_i t_j), \tag{15}$$

або

$$\overline{K}(t_i t_j) = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k v_i v_j. \tag{16}$$

Отримаємо матрицю кореляційних моментів:

$$\bar{K}_{ij} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1k} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{k1} & K_{k2} & \dots & K_{kk} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

По діагоналі розміщені дисперсії K_{ii} осідань марок t_1, t_2, \dots, t_k . Інші коефіцієнти K_{ij} розміщені симетрично відносно головної діагоналі, оскільки

$$\bar{D}(t_i) = K(t_i t_i) = \frac{1}{k-1} \sum_{l=1}^k v_i^2, \quad (18)$$

$$K_{ij} = K_{ji} = \frac{1}{k-1} \sum_{l=1}^k v_i v_j, \quad (19)$$

де $v_i = h_{ij} - \bar{h}_i$.

Коефіцієнти характеризують міру залежності осідань суміжних марок. Практично використовують безрозмірні коефіцієнти кореляції:

$$r(t_i, t_j) = \frac{\bar{K}(t_i, t_j)}{\sigma(t_i)\sigma(t_j)}. \quad (20)$$

За результатами обчислень отримаємо нормовану матрицю коефіцієнтів кореляції:

$$\bar{r}_{i,j} = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

При цьому стандарти визначення осідань марок обчислюють за формулою:

$$\sigma(t_i) = \sqrt{K_{ii}} = \sqrt{\bar{D}(t_i)}. \quad (22)$$

Коли коефіцієнти $r(t_i, t_j) \approx 0$, то відсутній зв'язок осідань між суміжними марками. Якщо $r(t_i, t_j) \approx \pm 1$, то йдеться про значний вплив осідань між суміжними марками. Це дає конструкторам можливість своєчасно ухвалити кваліфіковані рішення для усунення деформацій конструкцій споруди.

Якщо правильно обрано методику визначення осідань споруди з необхідною точністю, то результати вимірювань повинні бути в межах довірчого інтервалу (рис.1).

Визначені математичні сподівання для кожної марки характеризують осідання кожної марки, закріпленої на споруді.

Оскільки в кожному циклі вимірювань зберігається комплекс умов (методика вимірювань не змінюється), то можна обчислити незміщену оцінку дисперсії вектора h за формулою

$$m^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (k_i - 1)m_j^2}{(N - k)}, \quad (23)$$

де k – кількість марок закріплених на споруді; N – кількість всіх вимірювань.

Довірчий інтервал для можливих величин осідання закріплених марок визначають за формулою:

$$P\{y_i - tm \leq h_i \leq y_i + tm\} = P, \quad (24)$$

де y_i – обчислене значення функції y в i -циклі вимірювань; P – задана довірна ймовірність надійного визначення деформацій споруди; T – статистика, яку обирають за таблицею [3, дод.3] залежно від P і кількості марок k .

Межі довірного інтервалу показано на рис.1. Якщо результати всіх вимірювань не виходять за межі довірного інтервалу, то відбувається закономірний процес осідання за заданої точності вимірювань.

Коли деякі результати осідань марок виходять за межі довірного інтервалу, то можливими є два висновки:

- 1) якщо це стосується деяких марок, то вони характеризують нерівномірне осідання окремих марок, отже, і деформації конструкцій споруди;
- 2) якщо відхилення маємо по всьому полю, то вимірювання осідань споруди суперечить вимогам необхідної точності.

Висновок. Імовірісно-статистичний аналіз результатів дослідження осідань і деформацій інженерних споруд дає можливість на основі довірчих інтервалів отримати достовірні геометричні параметри стану споруди, визначити якісні характеристики як осідань або деформацій споруди, так і результатів вимірювання.

Одночасно запропоновано виконувати прогнозування характеру деформацій споруди за різними математичними моделями. Кореляційний аналіз результатів вимірювання дасть можливість більш якісно розробляти проекти з укріплення конструкцій споруди для стабілізації осідань і деформацій споруди загалом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Брайт П.И.* Геодезические методы измерения деформаций оснований сооружений / П.И. Брайт. – М.: Наука, 1965. – 298 с.
2. *Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений: текст* / Д.Ш. Михелев, И.В. Рунов, А.И. Голубцов. - Москва: Недра, 1977. - 151 с.
3. *Математичне оброблення геодезичних вимірів: підручник* / С.П. Войтенко, Р.В. Шульц, О.Й. Кузьмич, Ю.В. Кравченко; за ред. С.П. Войтенка. — К.: Знання, 2015. — 654 с.
4. *Руководство по наблюдениям за деформациями фундаментов зданий и сооружений [Текст]* / Науч.-исслед. ин-т оснований и подземных сооружений Госстроя СССР. Гос. проектный ин-т «Фундаментпроект» Минмонтажспецстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1967. - 93 с.

REFERENCES

1. Bright P.I. (1965). *Geodezicheskie metody izmereniya deformatsiy osnovaniy sooruzheniy [Geodesic methods for measuring the deformations of the foundations of structures]*. Moscow: Nauka [in Russian].
2. Mikhelev D.Sh., Runov I.V., & Golubtsov A.I. (1977). *Geodezicheskie izmereniya pri izuchenii deformatsiy krupnyih inzhenernyih sooruzheniy [Geodetic*

measurements in the study of deformations of large engineering structures] - Moscow: Nedra [in Russian].

3. Voitenko S., Schultz R., Kuzmich O., & Kravchenko Y.(2015). *Matematichne obroblyennya geodezichnih vymiriv [Mathematical processing of geodetic measurements]*. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].

4. *Rukovodstvo po nablyudenyam za deformatsiyami fundamentov zdaniy i sooruzheniy* (1967). [Guidance on monitoring deformations of foundations of buildings and structures]. Moscow: Stroizdat [in Russian].

С.П.Войтенко

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСАДОК И ДЕФОРМАЦИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

На современном этапе необходимо повышать степень информативности геодезических наблюдений за осадками и деформациями инженерных сооружений. В статье используется методика моделирования процесса деформаций сооружений с применением доверительных интервалов. Корреляционный анализ позволяет повысить качественный анализ результатов измерений и разработать более надежные конструктивные меры усиления конструкций, повысить надежность и долговечность их эксплуатации.

Ключевые слова: осадка, матрица, корреляционный момент, корреляция, функция, доверительный интервал.

S. Voitenko

PROBABILISTIC-STATISTICAL ANALYSIS OF SEDIMENTS AND DEFORMATIONS OF ENGINEERING CONSTRUCTION

The degree of awareness of geodetic measurements of precipitation and deformation the engineering construction should be increased at the present stage.

The technique for modeling the deformation processes of engineering structures by the use effective methods of probabilistic and statistical analysis the results of geodetic survey is considered in the article.

At the end of each measurement cycle, the development factor of sediments (or deformations) the structure is established according to the system fixed on the construction of sedimentary marks using the Abbe criterion is the peculiarity of the proposed method. The proposed technique allows to establish a stabilizer of structures sediments when increasing the measurement cycles.

The establishment of a uniform or non-uniform subsidence of different parts the structure on the basis of the use the confidence intervals theory is extremely important. The use of correlation analysis makes it possible to establish the degree of dependence (interrelation) of structural deformations between adjacent sedimentary marks. This enables designers and engineers to develop methods of reinforcing structures, which increases the reliability and durability of operation of the structure.

Mathematical models describing the emerging deformations (subsidence) of a structure with the aim of predicting and developing them over time are proposed.

Key words: *sediment, deformation, matrix, correlation moment, correlation, function, confidence interval.*

Надійшла до редакції

02.03.2018

УДК 528.48

В. С. Староверов, канд. техн. наук, професор,
К. О. Нікітенко, аспірант кафедри інженерної геодезії,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ДИСТАНЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВОДУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БПЛА СЕРІЇ SUPERCAM

У роботі розглянуто методи дистанційної діагностики трубопроводу, їх переваги і недоліки. Проаналізовано різні класи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що можуть бути економічнішими під час проведення ряду робіт порівняно з традиційними методами, а також здатними підвищувати безпеку і якість виконуваних робіт.

Запропоновано використання БПЛА серії Supercam, визначено їх точність і значний внесок в проведення інженерно-геодезичних вишукувань для газотранспортної системи. Завдяки безпілотникам для геодезії фахівці отримують дані, що дають змогу розробити моніторинг трубопроводу, зважаючи на раціональне використання й охорону навколишнього середовища, прогнозувати зміни природного середовища ділянки під впливом будівництва й експлуатації трубопроводу.

Ключові слова: *газопровід, безпілотні літальні апарати (БПЛА), дрон, дистанційна діагностика, цифрова модель поверхні (ЦМП).*

Вступ. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), відомі також як безпілотники або дрони, вже міцно закріпилися в багатьох галузях людської діяльності. Кількість їх зростає з величезною швидкістю, як і коло завдань, які можна вирішувати за їх допомогою.

Вимірювання й аерофотозйомка місцевості, виконувани безпілотними літальними апаратами, нині є актуальним і рентабельним вирішенням багатьох питань в галузі геодезії і топографії.

Використовувані в геодезії БПЛА, пролітаючи заданим маршрутом як в автоматичному, так і в напівавтоматичному режимі, отримують точні і достовірні фото- і відеоматеріали про особливості рельєфу місцевості, на якій заплановано будівельні роботи, виконують наземне лазерне сканування, геологорозвідку, моніторинг будівель і споруд. Отримані з безпілотника й оброблені в спеціалізованому програмному забезпеченні дані є основою в проектуванні будівництва, створенні цифрових й електронних карт, складанні топографічних