

DOI: 10.32347/2076-815x.2022.81.244-253

УДК 528.48

к.т.н., доцент **Медведський Ю.В.**,  
medvedskyi.iuv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0342-7088,  
д.т.н., професор **Анненков А.О.**,  
geodez74@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3618-5399,  
к.т.н., доцент **Ісаєв О.П.**,  
geo\_i@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2175-0324,  
к.т.н., доцент **Дем'яненко Р.А.**,  
Legend.geodesy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5405-3840,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИСОТНИХ СПОРУД

*Розглянуто існуючі методи, що застосовуються у задачах геодезичного моніторингу споруд, виконано аналіз можливостей та надано попередню оцінку точності їх використання при моніторингу висотних споруд. Виділено методи, які дозволяють отримувати результати вимірювань із високою частотою дискретизації та мають можливості до автоматизації. Визначено методи, що дозволяють вирішити задачу обчислення добових коливань споруди від впливу сонячної радіації та вітрового навантаження окремо від величин крену та осадок.*

*Ключові слова: геодезичний моніторинг; моніторинг споруд; методи моніторингу; моніторинг висотних споруд; відеовимірювальні методи.*

### **Проблема і її зв'язок із науковими і практичними завданнями.**

Постійне зростання розвитку технологій знаходить своє відображення у багатьох сферах нашого життя, науці, техніці та виробництві. Природно це зачіпає і будівельну галузь, адже зміни характеристик матеріалів дозволяє реалізувати задуми архітекторів у спорудах більш складної форми, а розвиток технічних засобів призводить до того, що раніше складні та амбітні проекти переходять до типових. У цих умовах, крім змін у складності форм споруд, ми спостерігаємо постійне зростання такого параметра як висотність, що у свою чергу веде до ускладнення виконання геодезичних робіт із забезпечення будівництва та моніторингу.

Ускладнення для проведення геодезичних робіт виникає як унаслідок збільшення виміру довжин чи кількості станцій вимірів, так і у результаті посилення впливу таких зовнішніх чинників як вітрове навантаження, сонячна радіація, зміна геологічного розрізу. Звичайно, всі ці фактори впливають на будь-яку споруджувану споруду, але у разі висотних споруд вони будуть мати різні

величини по всій довжині об'єкта будівництва, що призводить до складнощів у складанні прогнозованої моделі їх впливу. Як показав досвід зведення висотних об'єктів будівництва, вплив цих факторів призводять до коливань і кручень споруд, які змінюють своє значення протягом доби і можуть викликати зсув у десятки сантиметрів [18]. У таких умовах забезпечити успішне будівництво об'єкта можливе лише маючи методи геодезичного моніторингу, що дозволяють із досить високою частотою визначати або самі значення зовнішніх факторів, або їх результуючий вплив на споруду у вигляді крену, осадок та кручення, на підставі яких можна буде побудувати об'єктивну прогнозовану модель положення споруди.

**Метою роботи** є аналіз існуючих теоретичних та практично застосовуваних методів моніторингу споруд, які забезпечують необхідну точність та частоту отримання даних, та визначення найбільш підходящих методів для завдання геодезичного моніторингу висотних споруд.

**Аналіз останніх публікацій.** На сьогоднішній день значна кількість статей з тематики геодезичного моніторингу носять оглядовий характер, в них розглядають відразу безліч різних методів, але їх опис не містить повноти інформації щодо кожного конкретно взятого методу [3,4,10]. Більшість робіт з використання лазерного сканування в моніторингу споруд присвячені роботі, випущені протягом останніх кількох років [16], що свідчить про активний розвиток застосування даного методу та можливості появи нових підходів чи методик. Опис застосування фотограмметричних методів для вирішення цього завдання знайти проблематично, в основному вони згадуються в публікаціях оглядового характеру. Наприклад, у роботі [6] запропоновано новий підхід до розташування станцій сканування, що передбачає розташування сканера на спеціальних майданчиках, що виступають із вікон споруди. Значні напрацювання, як серед вітчизняних [11] так і серед зарубіжних дослідників [17] присвячені темі використання роботизованих тахеометрів. Цей підхід дуже популярний і має детально описану технологію виконання робіт та результати апробації методу на об'єктах як висотного будівництва і будівництва мостових переходів [1, 12].

Як подальший розвиток опубліковані матеріали щодо створення систем моніторингу зі спільною обробкою даних GNSS спостережень, від роботизованих тахеометрів та датчиків нахилу [2], математичний апарат яких у науковій літературі не розкритий через комерціалізацію даних систем. Періодично у зарубіжній літературі згадується відеовимірвальні методи [5, 14]. Незважаючи на їхній великий потенціал у вирішенні завдання моніторингу та автоматизації цього процесу, публікацій на цю тематику дуже мало.

**Виклад основного матеріалу.** Геодезичний моніторинг є комплексом заходів щодо визначення зміни геометричних параметрів і побудови прогнозної моделі станів споруджуваної споруди з точністю, що дозволяє забезпечити її будівництво та експлуатацію. Методи вирішення задачі геодезичного моніторингу загалом поділяють на кілька груп: прямі, непрямі та комбіновані методи.

Прямі методи засновані на безпосередньому вимірі величин зсуву, опади або нахилу споруди, до них відносяться:

1. Метод високоточного нівелювання [3, 13]. Заснований на проходженні нівелірного ходу через марки, закріплені на першому поверсі споруди, що зводиться і дозволяє визначити її осадку.

2. Метод лінійно-кутових вимірів. Заснований на використанні звичайних або роботизованих тахеометрів у парі із спеціальними відбивачами, які закріплені по всій довжині споруди. З метою визначення крену по двох його осях, мають дві лінії відбивачів у взаємно перпендикулярних площинах. Від пунктів зовнішньої геодезичної основи визначають координати відбивачів, зміна яких між циклами характеризують зміну геометрії споруди.

3. Метод лазерного сканування [6]. Заснований на складанні поверхні за результатами вимірювань лазерним сканером та пошуком зміщення між поверхнями у різних циклах спостереження.

4. Метод супутникової навігації [7, 12]. Заснований на спостереженнях за усуненням монтажного горизонту за результатами вимірювання координат CNSS приймача, який працює у статичному або мережевому режимі. Координати визначають від пари опорних пунктів геодезичної мережі, на яких розташовані приймачі GNSS або від віртуальних станцій у разі застосування мережного режиму.

5. Фотограмметричний метод [8, 15]. Заснований на отриманні пар зображень, із заданим відсотком поздовжнього та поперечного перекриття, на підставі яких можливо отримати стереозображення та зробити наступну зшивку в одне цільне зображення або побудувати модель об'єкта. За різницею моделей або усунення меж споруди між циклами визначають його крен і прогин. Для усунення проєкційних спотворень споруді можуть бути розташовані контрольні марки, координати яких визначають з допомогою тахеометра. Фотографування може бути виконане як з пунктів геодезичної мережі метричними камерами, так і з вільних станцій не метричними камерами.

6. Відеовимірювальний метод [5]. Метод, що ґрунтується на обробці відеопотоку від неметричної камери, у полі зору якої знаходиться контрольна

марка на споруді. При построговому аналізі відеопотоку відбувається визначення центру контрольної марки, із різниці між циклами визначають її планове зміщення. При достатній кількості контрольних марок та камер на споруді дозволяє з високою точністю визначати крен та кручення споруди.

7. Відеогідростатичний метод [14]. Метод, заснований на вимірі рівня рідини за допомогою провідної системи. Ця система - є системою рівнів, розташованих на фундаменті споруди із закріпленими датчиками в характерних точках фундаменту. У датчиках розташована камера, яка отримує відбите зображення системи світлодіодів від поверхні рідини. При зміні кута нахилу рідини відображене зображення зміститися, визначаючи зміщення між першим і наступними зображеннями можна отримати зсув кожної характерної точки фундаменту. Даний метод дозволяє визначати нахил фундаменту та нерівномірність осідання.

8. Метод зворотних схилів [14]. Заснований на використанні тонкого сталевого дроту, який закріплюють у основі споруди (у корінних породах), а рухливу частину направляють вгору, де створюють натяг за допомогою «поплавця». Струна розташована в трубі для того, щоб мати можливість зафіксувати струну при перенесенні поплавця на новий монтажний горизонт. Також передбачена координатна палетка для визначення зміщення споруди від початкового положення. Даний метод дозволяє визначати нахил споруди та її кручення.

9. Метод побудови вертикалі ПВП [15]. Заснований на використанні вертикального променя, створюваного за допомогою приладу вертикального проектування та визначення зміщення точки, що проектується, на координатну палетку протягом часу. Дозволяє визначати крен споруди та її кручення.

Непрямі методи засновані на використанні зовнішніх датчиків, які дозволяють визначати силу впливу зовнішніх факторів, наприклад силу вітру, температуру, вологість, і на підставі моделі поведінки споруди обчислювати шукані зміни геометричних параметрів. До цих систем належать такі методи:

1. Вимірювання деформацій та напруг за допомогою тензOMETричних датчиків
2. Вимірювання кута відхилення від початкового положення за допомогою інклінометрів
3. Вимірювання температури за допомогою датчиків температури
4. Вимірювання сили впливу вітру за допомогою датчиків тиску.

Зазвичай ці методи не застосовуються самостійно, лише як джерело додаткової інформації до безпосередніх методів або у складі комплексних методів.

Комбіновані методи ґрунтуються на використанні одного або декількох прямих методів у поєднанні з непрямими. Найчастіше мають назву систем моніторингу, в основі яких лежить використання роботизованих тахеометрів. До таких систем належать:

1. Система геодезичного моніторингу Leica [2, 9], яка заснована на спільному використанні тахеометра, GNSS приймачів, інклінометрів та програмного забезпечення для обробки результатів вимірювань та побудови прогнозної моделі.

2. Система геодезичного моніторингу «Візір 3D» [11] що складається з пари роботизованих тахеометрів та програмного забезпечення.

3. Система геодезичного моніторингу GOCA [17], Trimble [1] заснована на спільній роботі роботизованих тахеометрів та GNSS приймачів, також має своє програмне забезпечення.

Основними параметрами, які необхідно визначати при моніторингу висотних споруд є осадка, крен, прогин і кручення. Розглянемо можливості визначення цих параметрів існуючими методами, а результати зведемо до таблиці 1.

Табл. 1.

## Можливість визначення параметрів для моніторингу

Метод	Параметри для моніторингу			
	Осадка	Крен	Прогин	Кручення
Високоточне нівелювання	+	+/-	-	-
Лінійно-кутові виміри	+	+	+	+
Лазерне сканування	-	+	+	+/-
Супутникова навігація	+	+	-	+
Фотограмметричний	-	+	-	+/-
Відеовимірювальний	-	+	+/-	+
Відеогідростатичний	-	+	-	+
Зворотних схилів	-	+	-	+
Побудови вертикалі ПВП	-	+	-	+
Система геод. моніт. Leica	+	+	+	+
Система геод. моніт. «Візір 3D»	+/-	+	+	+
Система геод. моніт. GOCA	+	+	+	+

У таблиці використані такі символи, для опису застосування методу:

«+» - можливо визначити значення параметра,

«+/-» - параметр визначається не точно чи опосередковано,

«-» - параметр не визначається даним методом.

Аналізуючи наведену вище таблицю, можна побачити обмеженість застосування методів і зробити висновок про необхідність комбінації декількох

методів для повноцінного виконання завдання моніторингу. З метою визначення можливих комбінацій методів необхідно врахувати ще й такі важливі параметри для геодезичного моніторингу висотних споруд як швидкість, можлива частота та складність виконання робіт. Можлива частота виконання робіт виявляється як можливість провести повний цикл спостережень за одиницю часу. Швидкість – час виконання одного циклу спостережень та обробку результатів. Складність – це параметр, що описує міру трудомісткості проведення одного циклу спостережень, використання праці кількох фахівців, витрати на організаційні роботи з проведення циклу спостережень.

Прийmemo для параметра частоти дискретність одиниць на день, для параметрів швидкості та складності - числову характеристику від 0 до 10. Результати представимо у вигляді таблиці 2.

Табл.2.

Параметри частоти, швидкості та складності виконання робіт для методів геодезичного моніторингу.

Метод	Параметри моніторингу		
	Частота (од./день)	Швидкість	Складність
Високоточне нівелювання	1 - 2	3	7
Лінійно-кутові виміри	3 - 5	5	9
Лазерне сканування	4 - 6	5	6
Супутникова навігація	1440	9	3
Фотограмметричний	2 - 3	5	7
Відеовимірjuвальний	86400	9	1
Відеогідростатичний	86400	9	1
Зворотних схилів	1440	6	5
Побудови вертикалі ПВП	48	5	7
Система геод. моніт. Leica	1440	5	4
Система геод. моніт. «Візор 3D»	1440	5	4
Система геод. моніт. GOSA	1440	5	4

### Висновки та напрямок подальших досліджень.

Комбіновані методи із застосуванням роботизованих тахеометрів, GNSS приймачів та датчиків нахилу чудово справлятимуться зі своїм завданням, але є складною системою, яка потребує спеціалізованого персоналу, солідної матеріально-технічної бази та тісної взаємодії геодезичної служби на об'єкті з виконавцями робіт.

Використання лазерного сканування в задачі моніторингу висотної споруди поки що впирається в інструментальне обмеження дальності роботи

сканера, але враховуючи швидкий розвиток приладобудування в цій сфері, можна віднести цей метод до переліку перспективних.

Можлива комбінація відеовимірювального методу та побудови вертикалі ПВП дозволить комплексно вирішувати задачу геодезичного моніторингу висотного будівництва, але точність відеовимірювального методу, як і методу проведення робіт необхідно детально вивчити, оскільки наведена в роботі Буюкян С.П. методика не зовсім корелюється із заявленими точностями відеовимірювальних систем.

### Список літератури

1. Bridge, C. (2012). *Geodetic Monitoring Solutions for large infrastructure projects , Health Monitoring in Korea.*
2. Van Cranenbroeck, J. (2011). State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant. *FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May, May 2011*, 18–22.
3. Азаров, Б.Ф. (2011). Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений. *Ползуновский вестник*, 1, С. 19–29.
4. Бондаренко, И.Н., Мокасеев, А.В., Мартынов, А. (2016). Современные методы мониторинга за техническим состоянием зданий и сооружений в процессе их эксплуатации. *Предотвращение аварий зданий и сооружений*. С. 1–6.
5. Буюкян, С.П. (2016). *Разработка теоретических основ и методов решения специальных задач прикладной геодезии на основе видеоизмерений: дис., ... докт. техн. наук*. М., 168 с.
6. Вальков, В.А. (2015). *Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования : дис., ... канд. техн. наук*. СПб., 158 с.
7. Донец, А.М. (2005). Геодезический мониторинг высотных зданий и сооружений с помощью высокоточных спутниковых методов. *Геопрофи*, 5, С. 17–19.
8. Зайцев, А., Марфенко, С., Михелев, Д. (1992). *Геодезические методы исследований деформаций сооружений*.
9. Локтионов, К.С. (2010). Геодезические системы leica geosystems для мониторинга деформаций инженерно технических сооружений. *Геопрофи*, 6, С. 25–27.
10. Мелькумов, В.Н., Ткаченко, А.Н., Казаков, Д.А., Хахулина, Н.Б. (2015). *Технология и организация строительства*. 1(37), С. 51–58.
11. Могильный, С.Г., Ревуцкий, В.Н., Пригаров, В.А., Шоломицкий,

А.А. (2009). Геодезический мониторинг и выверка технологического оборудования. *Геопрофиль*, 3, С. 12–19.

12. Соколов, А.А. (2012). Автоматизированные системы геодезического мониторинга деформаций объектов транспортной инфраструктуры. *Наука и транспорт*, 4, С. 48–51.

13. Уставич, Г., Середович, С., Сальников, В., Скрипников, В. (2017). Геодезический мониторинг строительства жилого высотного здания. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 1(1), С. 93–99.

14. Фельдман, В.Д., Рязанцев, Г.Е., Горелов, В.А., Жидков, А.А., Буюкян, С.П., Назаров, И.А., Лавриненко, Е.Д., Еремеев, П.Г., Михелев, Д.Ш., Нефедова, В.В. (2010). *Методика геодезического мониторинга технического состояния высотных и уникальных зданий и сооружений*.

15. Шеховцов Г. А. Современные геодезические методы определения деформаций инженерных сооружений [Текст]: монография; / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова; *Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т –Н.Новгород: ННГАСУ*, 2009. – 156 с

16. Шульц, Р.В., Анненков, А.А., Куличенко, Н.В. (2016). Опыт использования современных технологий в задачах геодезического мониторинга высотных зданий. *Вестник МГСУ*, 1, С. 80–93.

17. Ягер, Р., Шпон, П., Шайхутдинов, Т., Горохова, Т. И., Янкуш, А. Ю. (2012). Математические модели и техническая реализация ГОСА – онлайн-системы геодезического мониторинга и оповещения о деформациях природных и техногенных объектов, основанная на точных спутниковых (GNSS) и наземных геодезических наблюдениях (LPS/LS). *Интерэкспо Гео-Сибирь*, С. 9–32.

18. Ященко, А.И., Евстафьев, О.В. (2009). Геодезическое обеспечение возведения небоскреба Burj Dubai\*. *Геопрофи*, 6, С. 8–13.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Yurii Medvedskiy**,  
Doctor of Technical Sciences, Professor **Andriy Annenkov**,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Oleksandr Isayev**,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Roman Demianenko**,  
Kyiv National University of Construction and Architecture

The article considers the existing methods used in the problem of geodetic monitoring of structures, analyzes the possibilities and gives a preliminary assessment of the accuracy of their use in monitoring high-rise structures. Methods have been identified that allow obtaining measurement results with a high sampling rate and have the potential for automation. Methods have been identified that allow solving the problem of calculating the daily fluctuations of a structure from the effects of solar

radiation and wind load separately from the values of heel and draft.

Keywords: geodetic monitoring; monitoring of structures; monitoring methods; monitoring of high-rise structures; video-measuring methods.

## REFERENCES

1. Bridge, C. (2012). Geodetic Monitoring Solutions for large infrastructure projects , Health Monitoring in Korea. {in South Korea}
2. Van Cranenbroeck, J. (2011). State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Plant. FIG Working Week 2011, Bridging the Gap between Cultures, Marrakech, Morocco, 18-22 May, May 2011, 18–22. {in Morocco}
3. Azarov, B.F. (2011). Современные методы геодезических наблюдений за деформациями инженерных сооружений. Ползуновский вестник, 1, 19–29. {in Russian}
4. Bondarenko, Y.N., Mokaseev, A.V., Martinov, A. (2016). Современные методы мониторинга за техническим состоянием здания и сооружений в процессе их эксплуатации. Предотвращение аварии здания и сооружений, 1–6. {in Russian}
5. Buiukian, S.P. (2016). Razrabotka teoreticheskikh osnov y metodov resheniya spetsialnykh zadach prykladnoi geodezii na osnove vydeoyzmereni: dys., ... dokt. tekhn. nauk. M., 168. {in Russian}
6. Valkov, V.A. (2015). Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологий наземного лазерного сканирования : dys., ... kand. tekhn. nauk. SPb., 158. {in Russian}
7. Donets, A.M. (2005). Геодезический мониторинг высотных зданий и сооружений с помощью высокоточных спутниковых методов. Неопроfy, 5, 17–19. {in Russian}
8. Zaitsev, A., Marfenko, S., Mykhelev, D. (1992). Геодезические методы исследования деформации сооружений. {in Russian}
9. Loktyonov, K.C. (2010). Геодезические системы leica geosystems для мониторинга деформации инженерно-технических сооружений. Неопроfy, 6, 25–27. {in Russian}
10. Melkumov, V.N., Tkachenko, A.N., Kazakov, D.A., Khakhulya, N.B. (2015). Tekhnologiya y orhanyzatsiya stroitelstva. 1(37), 51–58. {in Russian}
11. Mohylni, S.H., Revutskyi, V.N., Pryharov, V.A., Sholomytskyi, A.A. (2009). Геодезический мониторинг и проверка технологического оборудования. Неопроfy, 3, 12–19. {in Russian}

12. Sokolov, A.A. (2012). Avtomatyzirovannyye systemy heodezycheskoho monytorynha deformatsyi ob'ektov transportnoi ynfrastruktury. *Nauka y transport*, 4, 48–51. {in Russian}
13. Ustavych, H., Seredovych, S., Salnykov, V., Skrypnykov, V. (2017). Heodezycheskyi monytorynh stroytelstva zhyloho vysotnoho zdaniya. *Ynterəkspo Heo-Sybyr*, 1(1), 93–99. {in Russian}
14. Feldman, V.D., Riazantsev, H.E., Horelov, V.A., Zhydkov, A.A., Buiukian, S.P., Nazarov, Y.A., Lavrynenko, E.D., Ereemeev, P.H., Mykhelev, D.Sh., & Nefedova, V.V. (2010). Metodyka heodezycheskoho monytorynha tekhnicheskoho sostoianiya vysotnykh y unykalnykh zdaniy y sooruzheniy. {in Russian}
15. Shekhovtsov, H.A., Shekhovtsova, R.P. (2014). Sovremennyye heodezycheskiye metody opredeleniya deformatsyi ynzhenernykh sooruzheniy. {in Russian}
16. Shults, R.V., Annenkov, A.A., Kulychenko, N.V. (2016). Oпит yspolzovaniya sovremennykh tekhnolohiy v zadachakh heodezycheskoho monytorynha vysotnykh zdaniy. *Vestnyk MHSU*, 1, 80–93. {in Russian}
17. Iaher, R., Shpon, P., Shaikhutdynov, T., Horokhova, T. Y., Yankush, A. Yu. (2012). Matematycheskiye modely y tekhnicheskaya realizatsiya GOCA – onlain-systemy heodezycheskoho monytorynha y opoveshcheniya o deformatsiyakh pryrodnykh y tekhnicheskikh ob'ektov, osnovannaia na tochnykh sputnykovykh (GNSS) y nazemnykh heodezycheskykh nabliudeniakh (LPS/LS). *Ynterəkspo Heo-Sybyr*, 9–32. {in Russian}
18. Yashchenko, A.Y., Evstafev, O.V. (2009). Heodezycheskoe obespechenye vozvedeniya neboskreba Burj Dubai\*. *Heoprofy*, 6, 8–13. {in Russian}