

DOI: 10.32347/2076-815x.2026.91.586-599

УДК 528.4:624.042.8:681.518

к.т.н., доцент **Дем'яненко Р.А.**,
demianenko.ra@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-5405-3840,
д.т.н., професор **Аннеков А.О.**,
annenkov.ao@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3618-5399,
к.т.н., доцент **Медведський Ю.В.**,
medvedskyi.iuv@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0342-7088,
Ніколайко С.М.,
srnik2@gmail.com, ORCID: 0009-0006-7219-8978,
Київський національний університет будівництва і архітектури

АКТУАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ТА СПЕЦИФІКА ВИКОРИСТАННЯ ГНСС-ТЕХНОЛОГІЙ У ГЕОДЕЗИЧНИХ СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Здійснено системний аналіз сучасних підходів до геодезичного моніторингу інженерних споруд із акцентом на специфіку та переваги використання ГНСС-технологій у геодезичних системах спостережень. Показано, що в умовах зростання складності інженерних об'єктів, збільшення їх просторових розмірів і підвищених вимог до безпеки експлуатації традиційні геодезичні методи моніторингу не завжди забезпечують необхідний рівень оперативності та повноти інформації. Обґрунтовано доцільність переходу від ізольованого використання окремих методів до комплексних автоматизованих систем геодезичного моніторингу.

У роботі узагальнено класифікацію методів геодезичного моніторингу за характером визначення переміщень, виділено абсолютні та відносні методи, а також осьові, висотні, планові й просторові групи спостережень. Доведено, що для відповідальних та конструктивно складних інженерних споруд найбільш ефективними є просторові методи, які забезпечують одночасне визначення вертикальних і горизонтальних переміщень, а також кренів. На основі порівняльного аналізу просторових методів за критеріями надійності, вартості, доступності технологій та ступеня автоматизації встановлено, що ГНСС-технології найбільш повно відповідають сучасним вимогам геодезичного моніторингу.

Ключові слова: геодезичний моніторинг; інженерні споруди; ГНСС-технології; просторові переміщення; автоматизовані системи моніторингу; деформації; RTK; псевдо літи.

Постановка проблеми: Сучасне будівництво та експлуатація інженерних споруд характеризуються зростанням їх просторової складності, масштабів і динамічних навантажень, що зумовлює підвищені вимоги до контролю переміщень і деформацій. Традиційні геодезичні методи моніторингу, попри високу точність, часто є трудомісткими, обмеженими за частотою спостережень і не завжди придатними для оперативного аналізу просторових переміщень у режимі реального часу. Водночас економічні обмеження вимагають оптимізації систем моніторингу без втрати інформативності та надійності результатів.

Проблема полягає у виборі таких методів геодезичного моніторингу, які забезпечують комплексне визначення вертикальних і горизонтальних переміщень та кренів інженерних споруд за мінімальних витрат і з високим рівнем автоматизації. У цьому контексті актуальним є дослідження можливостей ГНСС-технологій як одного з найбільш прогресивних інструментів геодезичного моніторингу та обґрунтування доцільності їх застосування у складі сучасних автоматизованих систем спостережень.

Метою статті є аналіз сучасних підходів до геодезичного моніторингу інженерних споруд та обґрунтування специфіки й переваг використання ГНСС-технологій у геодезичних системах спостережень. Досягнення мети передбачає класифікацію методів геодезичного моніторингу, порівняльну оцінку просторових методів за ключовими техніко-економічними критеріями, аналіз режимів ГНСС-спостережень і розгляд можливостей їх інтеграції в автоматизовані системи контролю переміщень і деформацій інженерних споруд.

Аналіз останніх досліджень і публікацій: У наукових дослідженнях з інженерної геодезії значна увага приділяється методам контролю переміщень і деформацій інженерних споруд. У працях вітчизняних і зарубіжних авторів розглянуто традиційні геодезичні методи, а також сучасні просторові технології, зокрема наземне лазерне сканування, фотограмметрію та супутникові методи позиціонування. Окремий напрям досліджень присвячений застосуванню ГНСС-технологій для моніторингу висотних будівель, мостів і гідротехнічних споруд.

Виклад основної інформації: За багаторічну історію геодезичної науки було розроблено чимало методів та технологічних підходів до виконання геодезичного моніторингу. В останні роки з'явився цілий ряд нових методів, які поступово витісняють традиційні геодезичні методи моніторингу.

Проте необхідно пам'ятати, що ефективність обраного методу геодезичного моніторингу дуже сильно корелює з вартістю його організації. В багатьох випадках немає необхідності побудови надто складних систем геодезичного моніторингу, оскільки часто характер деформації інженерної

споруди та причини виникнення переміщень є відомими і постає завдання спостереження за конкретними параметрами за заданими напрямками переміщень.

Загалом всі методи геодезичного моніторингу можна класифікувати за характером визначення переміщення на два класи: абсолютні та відносні. В середині кожного з цих класів можна виділити чотири групи методів: осьові, висотні, планові, просторові.

В результаті виконаного аналізу відомі методи геодезичного моніторингу було класифіковано за характером переміщень (рис. 1).

До планових відносять методи прямих, зворотних, лінійних засічок, лінійно-кутових мереж, комбінований метод, що об'єднує вимірювання напрямків, кутів, відстаней і відхилень від створів [1].

Відповідальні та конструктивно складні інженерні споруди вимагають повного комплексу досліджень, тобто за вимогами ДБН в процесі геодезичного моніторингу повинні бути визначені (окремо або сумісно) величини [2]:

- вертикальних переміщень (осідань, просідань, підйомів);
- горизонтальних переміщень (зміщень);
- кренів.

Визначення всіх цих характеристик одночасно вимагає застосування декількох методів, тому з метою оптимізації процесу вимірювань та досягнення економічного ефекту, серед відомих методів спостереження найбільшу увагу слід зосередити на просторових методах.



Рис. 1. Методи геодезичного моніторингу
(розроблено авторами на основі [1])

Аналізуючи відомі просторові методи класифікуємо їх за наступними ознаками [3]:

- 1) Ступінь пророблення методу;
- 2) Надійність отриманих результатів;
- 3) Вартість устаткування;
- 4) Доступність технології;
- 5) Ступінь автоматизації та простота користування.

Для простоти опишемо ці ознаки за трьома рівнями: високий, середній, низький. Результати представимо в табл. 1.1, де прийнято наступну систему позначень: ■ – низький; ■ – середній; ■ – високий.

Аналіз рисунку 2 дозволяє зробити висновок, що з існуючих на сьогоднішній день найбільш повно поставленим завданням геодезичного моніторингу відповідають методи спостережень з використанням ГНСС-технологій та побудови просторових геодезичних мереж.



Рис. 2. Порівняльний аналіз просторових методів
(розроблено авторами на основі [3])

Порівняння цих двох методів за вказаними критеріями вказує на певну перевагу ГНСС-методу, як такого який при умові повної автоматизації не вимагає використання дорогого і складного устаткування якими є роботизовані електронні тахеометри.

Іншою важливою перевагою ГНСС-методу є відсутність необхідності прямої видимості між опорними, допоміжними та деформаційними знаками. Тож всі подальші дослідження зосередимо на проблемі ГНСС-методу, як одного з найбільш прогресивних методів для дослідження переміщень

інженерних споруд. Відправним пунктом нашого дослідження стане аналіз сучасного стану та технічних можливостей ГНСС-технологій.

Сучасне будівництво характеризується значним збільшенням будівництва споруд для яких обов'язковим є визначення переміщень в просторі (висотні будівлі, мости, греблі, стадіони та ін.), при цьому частота визначення переміщень може складати 1 год. або навіть частіше. В таких умовах використання традиційних методів моніторингу, незважаючи на високий рівень автоматизації, є доволі проблематичним. Особливо складним є застосування традиційних методів при виконанні моніторингу об'єктів, що мають значні розміри (більше 1 км по одній з головних осей) та вимагають фіксації переміщень всієї споруди відносно заданої зовнішньої системи координат [4].

При використанні ГНСС перевагу віддають координатам опорного пункту в геоцентричній декартовій системі координат (X, Y, Z) . Від точності цих координат залежить положення створюваної мережі в загальній координатній системі. Точність координат опорного пункту впливає на масштаб геометричних побудов в створюваній мережі.

Абсолютні значення координат опорного пункту отримують на основі сумісних диференціальних вимірювань до пунктів, що входять до складу сучасних глобальних або континентальних мереж (IGS або EUREF). При цьому може бути забезпечена точність абсолютних значень планових координат опорного пункту на рівні декількох сантиметрів.

При виконанні геодезичного моніторингу можливим є застосування:

- статичного методу (Static);
- прискореного статичного методу (Rapid Static);
- методу з поверненням (Reoccupation).

Вимоги до методики спостережень формуються двома головними факторами: точністю визначення переміщень та швидкістю деформаційного процесу. Звичайно, статичний метод є ідеальним для високоточних спостережень. Однак при спостереженнях деформаційних процесів, що розвиваються досить стрімко (швидкість 30-50мм/день), наприклад зсувні процеси або коливання баштових споруд, достатнім може бути використання і інших режимів спостережень, наприклад прискореного статичного методу (Rapid Static) або кінематики у реальному часі (RTK). Рекомендації, щодо виконання вимірювань можна знайти у багатьох роботах, що стали класичними.

Технічно, точність визначення планового положення та різниці геодезичних висот задаються у вигляді рівнянь регресії:

$$m_p = a + bD; \quad m_H = a' + b'D, \quad (1)$$

де D - довжина базової лінії; $a = 3 - 5$ мм, $b = 0.1 - 0.4 \times 10^{-6}$ мм, $a' = 3.5 - 5$ мм, $b' = 0.4 - 1 \times 10^{-6}$.

Параметри рівнянь задаються в технічних характеристиках приймачів. Вирази (1.1) відносяться до середніх умов спостережень, що відповідають рекомендаціям фірм-виробників, довжині базової лінії, тривалості сеансу спостережень, кількості супутників та їх геометрії. Обов'язковою умовою є використання відповідного програмного забезпечення та методики оброблення вимірів.

У випадку вирішення завдання геодезичного моніторингу придатним є тільки відносний метод. По-перше він дозволяє досягти найвищої точності, а по-друге спостереження за переміщеннями інженерних споруд найчастіше виконуються в умовній системі координат, що не вимагає абсолютного позиціонування об'єкту в прийнятих глобальних системах координат [5].

Для ідеального випадку спостережень та правильного математичного моделювання середня квадратична похибка визначення базової лінії відносним методом обчислюється за формулою:

$$m_p = 0.7D^{0.58}, \quad (2)$$

а відносна похибка обчислюється, як:

$$\frac{m_{\Delta p}}{D} = 0.7D^{-0.42} \approx \sqrt{\frac{1}{2D}} \quad (3)$$

де D - в мм.

Оскільки точність ГНСС-спостережень дуже сильно залежить від довжини лінії та тривалості спостережень, то для наближених розрахунків рекомендується використовувати формули, що отримані Національною геодезичною службою США:

$$m_x = \frac{k_x}{\sqrt{T}}; \quad m_y = \frac{k_y}{\sqrt{T}}; \quad m_z = \frac{k_z}{\sqrt{T}} \quad (4)$$

де T - тривалість сеансу спостережень в годинах. Значення коефіцієнтів k_x , k_y , k_z можна знайти на сайті NGS.

З поступовим удосконаленням всіх сегментів ГНСС, розвитком телекомунікаційних технологій та удосконаленням програмного забезпечення оброблення ГНСС-вимірювань, було розроблено та реалізовано на практиці метод визначення відносного місцеположення в режимі RTK. В порівнянні зі статичним визначенням відносного місцеположення метод RTK, має нижчу точність, однак коли мова йде про спостереження великих інженерних споруд,

для яких величини переміщень на рівні 10-15 мм в просторі є нормальними, метод RTK став революційним винаходом.

Головна відмінність і перевага цього методу в порівнянні із статичним це визначення координат точок в режимі реального часу з частотою, що досягає 10 Гц. Особливо корисним є застосування методу RTK для моніторингу споруд, що перебувають під впливом динамічних навантажень (мости, телевежі, хмарочоси), які мають антропогенне (рух транспорту) або природне походження (вітер, температура, землетрус) [6].

Більш складним, як з фінансової так і організаційної точки зору є організація ГНСС-моніторингу з використання псевдосателітів (псевдолітів). Псевдоліт являє собою встановлений на місцевості в точці з відомими координатами прилад, який працює аналогічно до супутника на орбіті, тобто випромінює радіосигнал на певній частоті. Цей сигнал сприймається ГНСС-приймачем, як сигнал від додаткового супутника з відомими координатами. Завдяки встановленню на земній поверхні псевдоліт значно покращує загальну геометрію супутників, що значно підвищує точність визначення приростів координат. Можливі декілька варіантів побудови моніторингових мереж з використанням псевдолітів (рис. 3-4).

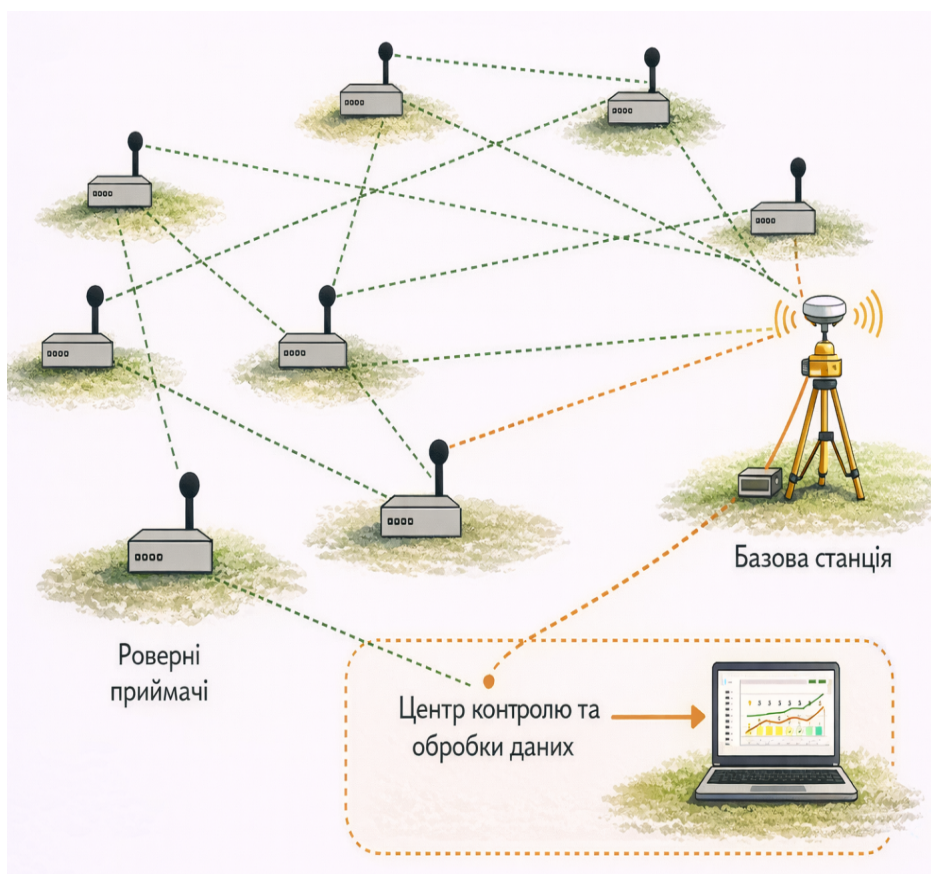


Рис. 3. Конфігурація системи моніторингу на базі псевдолітів
(розроблено авторами на основі [6])

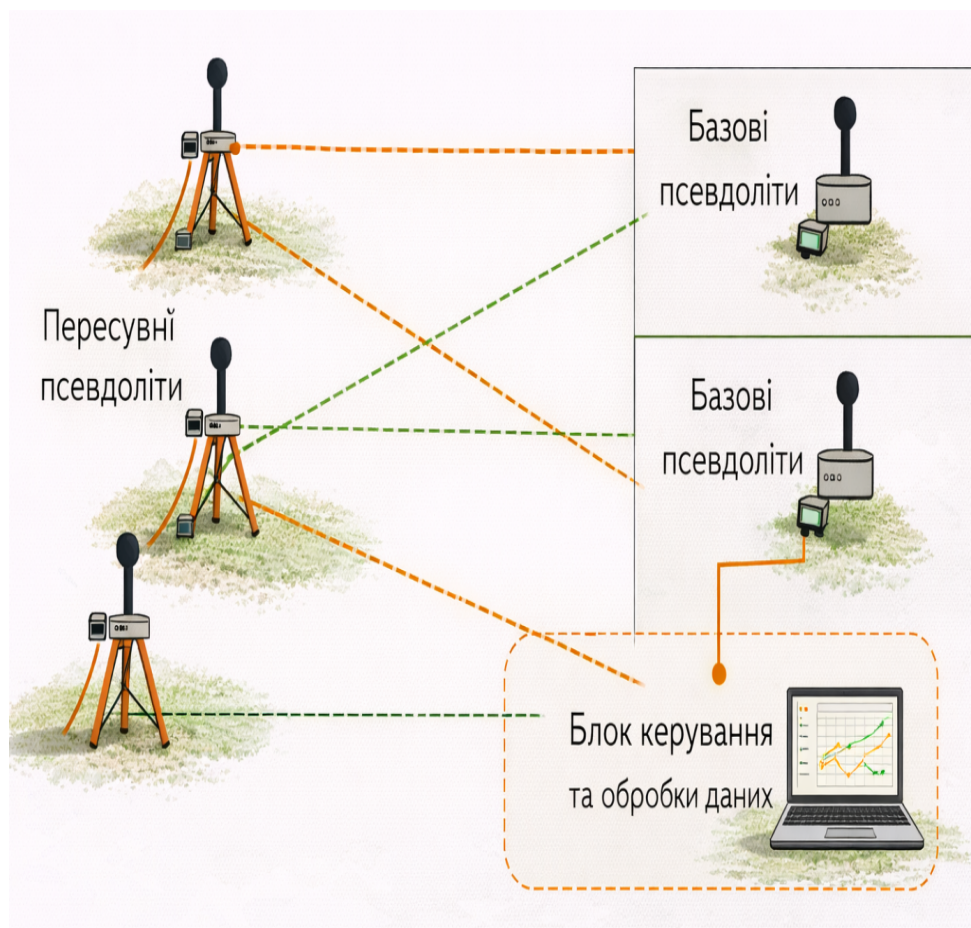


Рис. 4. Конфігурація оберненої системи моніторингу на базі псевдолітів
(розроблено автором на основі [6])

В першому варіанті псевдоліт відіграє роль додаткового супутника на земній поверхні. В другому варіанті спостереження за космічними супутниками взагалі непотрібні. Псевдоліти встановлюють на точках спостереження, а їх координати визначають відносно двох ГНСС-приймачів. Третій варіант має назву «оберненого», в ньому ГНСС-приймачі встановлюють на точках об'єкту і виконують засічку відносно псевдолітів, що встановлені на пунктах з відомими координатами [7].

Наведене нижче систематизоване викладення сучасного рівня розвитку та можливостей ГНСС-технологій для вирішення завдань геодезичного моніторингу, дозволяє побудувати узагальнену технологічну схему виконання геодезичного моніторингу інженерних споруд засобами ГНСС-технологій (рис. 5) [8].

Виходячи зі схеми видно, що система моніторингу може включати комплекс вимірювальної апаратури, оптимально для конкретного об'єкту. Це можуть бути комплексні рішення, що включають ГНСС-приймачі (референсні і моніторингові), оптико-електронні роботизовані станції-моніторингу (тахеометри) і допоміжні датчики нахилу, температури і так далі об'єднані

мережами комунікацій в єдиний автоматизований комплекс моніторингу об'єкту.



Рис. 5. Блок-схема визначення переміщень ГНСС-методом (розроблено авторами на основі [8])

Програмне забезпечення Trimble 4D Control – дозволяє працювати як в режимі реального часу (для цього потрібні канали зв'язку з мінімальною затримкою передачі даних), так і в автоматизованому режимі камерального оброблення (в цьому випадку достатнє застосування каналів зв'язку, що дозволяють провести передачу файлів за розкладом), або ж в режимі, що є комбінацією перерахованих вище. Доступний також “сеансовий” тип обробки. В цьому випадку прилади накопичують дані вимірювань протягом тривалого періоду, після чого файли передаються в центр обробки.

Характеризуючи систему геодезичного моніторингу Trimble4D Control відмітимо її особливості [9]:

- Головними джерелами інформації в системі Trimble4D Control є ГНСС-вимірювання та вимірювання за допомогою електронних тахеометрів, всі інші вимірювальні засоби використовуються тільки, як допоміжні.
- Аналітичний блок аналізу переміщень системи Trimble4D Control є достатньо слабким з обмеженими функціями аналізу.

Інший варіант АСГМ запропоновано японською фірмою Topcon. Система отримала назву DC3, її структурну схему наведено на рис. 6 (за матеріалами сайту компанії Topcon).



Рис. 6. Складові елементи системи геодезичного моніторингу DC3 (розроблено автором на основі [9])

Найчастіше в системі DC3 використовують електронні тахеометри. В системі DC3 використовуються моторизовані тахеометри Topcon IS, Topcon GPT-9000, Topcon GTS-900. Для спостережень за осіданнями можуть бути використані цифрові нівеліри Topcon DL-100.

Система геодезичного моніторингу DC3 ґрунтується переважно на даних електронних тахеометрів, тоді як ГНСС-вимірювання мають допоміжний характер і функціонально чітко не регламентовані. Найбільш відомою і відпрацьованою системою геодезичного моніторингу в світі є система структурного моніторингу Leica GeoMoS швейцарської компанії Leica [11].

Кожен проект моніторингу має певні вимоги до вимірювань і їх точності. Програмне забезпечення Leica GeoMoS забезпечує функціонування дуже гнучкої автоматичної системи контролю за переміщеннями, яка в змозі об'єднати дані геодезичних, геотехнічних і метеорологічних датчиків.

Висновки. До складу будь-якої системи геодезичного моніторингу входить ГНСС-обладнання, ступінь використання цього обладнання є різною і викликана не повним дослідженням можливостей ГНСС-технологій. В більшості АСГМ основним джерелом вимірювальної інформації є ГНСС або електронній тахеометри. Якщо референсна мережа створюється тільки з використанням ГНСС-технологій, то станції-моніторингу створюються, або у вигляді ГНСС-станцій, або станцій з електронними тахеометрами. Порівнюючи можливості реалізації цих варіантів, можна відмітити, що переваги і недоліки ГНСС референцної станції/станції-моніторингу наступні:

- + великі відстані;
- + висока швидкість реєстрації;
- + точний диференціальний метод;
- + не вимагає прямої видимості;
- обмежена однією/двома точками.

Література

1. Нестеренко С.Г. Modern aspects of methodological support of geodetic monitoring // Kherson State Maritime Academy Scientific Journal. Series: Engineering Sciences. — 2024. — Vol. 3, Iss. 64, P. 1-10. — Режим доступу: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/en/article/view/6408>
2. Яковенко М.С. Геодезичні методи контролю переміщень і деформацій при виконанні робіт з обстеження будівель / М. С. Яковенко. — 2025. — Режим доступу: <https://surl.li/ziqxzhv>
3. Zabolotna Y.O., Koroviaka Ye.A., Pashchenko O.A., Rastsvietaiev V.O. Modern geodetic and mine surveying technologies for deformation monitoring / Yu.O. Zabolotna, Ye.A. Koroviaka, O.A. Pashchenko, V.O. Rastsvietaiev //

Technichna inzheneriya. — 2025. — № 1 (95). — Режим доступу: <https://surl.li/fzrxkf>

4. Meneses S.F.M. III Analysis of GNSS Rapid Static Observations Suitability for Engineering Surveys / S.F.M. Meneses III. — 2021. — Режим доступу: <https://d-nb.info/1246449242/34>

5. EUREF Permanent Network (EPS) // Wikipedia. — Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/EUREF_Permanent_Network

6. Qu X., Shu B., Ding X., Lu Y., Li G., Wang L. Experimental Study of Accuracy of High-Rate GNSS in Context of Structural Health Monitoring // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14, Art. 4989. — Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/rs14194989>

7. Novaković G., Đapo A., Mahović H. Development and Application of Pseudolites for Positioning and Navigation / G. Novaković, A. Đapo, H. Mahović // Geodetski List. — 2009. — Vol. 3, P. 215–241. — Режим доступу: <https://surl.li/plpmlr>

8. Jäger R., González F. GNSS/LPS-Based Online Control and Alarm System (GOCA): Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention / R. Jäger, F. González // In: Sansò F., G. Gil (Eds.), Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. IAG Symposia Series. — Heidelberg: Springer, 2006. — P. 293–303. — Режим доступу: <https://surl.li/cdymxf>

9. Trimble Inc. Trimble 4D Control Software — Monitoring Solution for Automated Movement Detection / Trimble Inc. — Режим доступу: <https://surl.lu/eusoet>

10. Jäger R., Hoscislowski A., Oswald M. GNSS/LPS-based Online Control and Alarm System (GOCA) — Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention / R. Jäger, A. Hoscislowski, M. Oswald. — Karlsruhe: Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, 2005. — Режим доступу: <https://surl.lu/rursfx>

11. Leica Geosystems AG. Leica GeoMoS Monitoring Solution — автоматизоване програмне забезпечення для деформаційного моніторингу з підтримкою інтеграції різних датчиків і високою точністю обробки даних. — Режим доступу: <https://surl.li/zvvzlh>

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor **Roman Demianenko**,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Andrii Annekov**,
Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor **Yurii Medvedskiy**,
Nikolaiko Serhii,
Kyiv National University of Construction and Architecture

CURRENT APPROACHES TO MONITORING ENGINEERING STRUCTURES AND THE SPECIFICS OF USING GNSS TECHNOLOGIES IN GEODETIC OBSERVATION SYSTEMS

The article presents a systematic analysis of modern approaches to the geodetic monitoring of engineering structures, with a particular focus on the specifics and advantages of using GNSS technologies in geodetic observation systems. It is shown that under conditions of increasing structural complexity of engineering facilities, expansion of their spatial dimensions, and heightened operational safety requirements, traditional geodetic monitoring methods do not always provide the necessary level of efficiency and completeness of information. The feasibility of transitioning from the isolated application of individual methods to integrated automated geodetic monitoring systems is substantiated.

The paper generalizes the classification of geodetic monitoring methods according to the nature of displacement determination, distinguishing between absolute and relative methods, as well as axial, vertical, planimetric, and spatial observation groups. It is proven that for critical and structurally complex engineering structures, spatial methods are the most effective, as they ensure the simultaneous determination of vertical and horizontal displacements, as well as tilts. Based on a comparative analysis of spatial methods according to reliability, cost, technological availability, and degree of automation, it is established that GNSS technologies most fully meet the current requirements of geodetic monitoring.

Keywords: geodetic monitoring; engineering structures; GNSS technologies; spatial displacements; automated monitoring systems; deformations; RTK; pseudolites

REFERENCES

1. Nesterenko, S.H. Modern Aspects of Methodological Support of Geodetic Monitoring. *Kherson State Maritime Academy Scientific Journal. Series: Engineering Sciences*, 2024, Vol. 3, Issue 64, pp. 1–10. [Electronic resource]. – Available at: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/en/article/view/6408> {in English}

2. Yakovenko, M.S. Geodetic Methods for Controlling Displacements and Deformations During Building Inspection Works. 2025. [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.li/zlxzhv> {in Ukrainian}
3. Zabolotna, Yu.O., Koroviaka, Ye.A., Pashchenko, O.A., & Rastsvietaiev, V.O. Modern Geodetic and Mine Surveying Technologies for Deformation Monitoring. *Technichna Inzheneriya*, 2025, No. 1 (95). [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.li/fzrxkf> {in English}
4. Meneses, S.F.M. III. Analysis of GNSS Rapid Static Observations Suitability for Engineering Surveys. 2021. [Electronic resource]. – Available at: <https://d-nb.info/1246449242/34> {in English}
5. EUREF Permanent Network (EPN). Wikipedia. [Electronic resource]. – Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/EUREF_Permanent_Network {in English}
6. Qu, X., Shu, B., Ding, X., Lu, Y., Li, G., & Wang, L. Experimental Study of Accuracy of High-Rate GNSS in the Context of Structural Health Monitoring. *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 4989. [Electronic resource]. – Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14194989> {in English}
7. Novaković, G., Đapo, A., & Mahović, H. Development and Application of Pseudolites for Positioning and Navigation. *Geodetski List*, 2009, Vol. 3, pp. 215–241. [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.li/plpmlr> {in English}
8. Jäger, R., & González, F. GNSS/LPS-Based Online Control and Alarm System (GOCA): Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention. In: Sansò, F., & Gil, G. (Eds.), *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*. IAG Symposia Series. Heidelberg: Springer, 2006, pp. 293–303. [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.li/cdymxf> {in English}
9. Trimble Inc. Trimble 4D Control Software – Monitoring Solution for Automated Movement Detection. [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.lu/eusoet> {in English}
10. Jäger, R., Hoscislowski, A., & Oswald, M. GNSS/LPS-Based Online Control and Alarm System (GOCA): Mathematical Models and Technical Realisation of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention. Karlsruhe: Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 2005. [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.lu/rursfx> {in English}
11. Leica Geosystems AG. Leica GeoMoS Monitoring Solution – Automated Software for Deformation Monitoring with Support for Multi-Sensor Integration and High-Precision Data Processing. [Electronic resource]. – Available at: <https://surl.li/zvvzlh> {in English}