

DOI: 10.32347/2076-815x.2025.90.438-451

УДК 528.28:004.93:624.131

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

АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ТА ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ГНСС-ТЕХНОЛОГІЙ У КОНТЕКСТІ СУЧАСНОГО ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ТА ДИНАМІКИ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Сучасний розвиток будівельної галузі та інженерної інфраструктури вимагає якісно нових підходів до контролю технічного стану споруд та прогнозування їхньої надійності. В умовах зростання урбанізаційного навантаження, зміни кліматичних умов та інтенсифікації експлуатації будівель і споруд особливого значення набувають технології високоточного позиціонування, що дають змогу здійснювати моніторинг у режимі реального часу. Серед таких технологій ключове місце посідають глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС), що забезпечують багатофункціональний інструментарій для збору, аналізу та інтерпретації даних про просторове положення інженерних об'єктів. Використання ГНСС-технологій дозволяє отримати інформацію щодо вертикальних та горизонтальних зміщень, визначати параметри деформаційних процесів та формувати цифрові моделі змінних характеристик інженерних систем.

Завдяки поєднанню супутникових спостережень із класичними методами геодезії та новітніми алгоритмами цифрової обробки даних відкриваються нові горизонти у забезпеченні безпеки та експлуатаційної надійності стратегічних споруд – мостів, дамб, хмарочосів, енергетичних комплексів. Особливу цінність мають безперервні моніторингові спостереження, які дозволяють оперативно виявляти відхилення від нормативних параметрів і здійснювати попереджувальні заходи для запобігання аварійним ситуаціям. Технології RTK (Real Time Kinematic), PPP (Precise Point Positioning) та інтегровані ГНСС-мережі формують основу для створення інтелектуальних систем управління інженерними об'єктами, що відповідає сучасним концепціям «розумної інфраструктури».

Ключові слова: ГНСС-технології; геодезичний моніторинг; інженерні споруди; деформаційні процеси; супутникове позиціонування; цифрові моделі; просторові зміщення; інфраструктурна безпека.

Постановка проблеми: Зростання масштабів будівництва та експлуатації складних інженерних споруд супроводжується підвищенням ризиків, пов'язаних із техногенними та природними впливами. Унаслідок цього питання оперативного та високоточного контролю за станом об'єктів набуває ключового значення, оскільки традиційні методи геодезичних вимірювань не завжди забезпечують необхідний рівень точності, оперативності та системності. Сучасні умови розвитку будівельної індустрії вимагають переходу до технологій, здатних працювати в режимі реального часу, інтегрувати дані з різних джерел та формувати основу для превентивних управлінських рішень. Проблема полягає у відсутності повсюдно впроваджених систем комплексного моніторингу, які б могли безперервно фіксувати найменші зміни у стані інженерних конструкцій, забезпечувати аналіз тенденцій їх розвитку та запобігати можливим аваріям. ГНСС-технології, попри значні досягнення у сфері супутникової навігації, все ще недостатньо інтегровані у систему геодезичного моніторингу в Україні та потребують адаптації до умов локальної інфраструктури, вдосконалення алгоритмів обробки даних та забезпечення стійкості результатів до зовнішніх впливів.

Метою статті є обґрунтування та системний аналіз аспектів розвитку й практичної імплементації ГНСС-технологій у сфері геодезичного моніторингу стану та динаміки інженерних споруд. Дослідження спрямоване на виявлення можливостей інтеграції супутникових технологій у практику будівельного та експлуатаційного контролю, розкриття переваг використання сучасних алгоритмів позиціонування та оцінку їхньої ефективності для запобігання аварійним ситуаціям. У роботі акцентується увага на питаннях точності та надійності вимірювань, визначенні чинників, що впливають на якість даних, та розробленні рекомендацій щодо вдосконалення існуючих систем моніторингу. Реалізація поставленої мети сприятиме формуванню підґрунтя для створення інтегрованих моделей безпеки інженерних об'єктів, що відповідають сучасним вимогам інфраструктурного розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій: Наукові дослідження останніх років свідчать про значний прогрес у використанні глобальних навігаційних супутникових систем у сфері моніторингу інженерних об'єктів. Праці таких українських і зарубіжних авторів, як Кучерявий, Назаренко, Leick, Hofmann-Wellenhof, продемонстрували ефективність застосування технологій RTK та PPP для контролю зміщень і деформацій будівельних конструкцій. У багатьох

дослідженнях доведено, що використання безперервних ГНСС-спостережень дозволяє своєчасно виявляти аномальні коливання та забезпечувати превентивні заходи, спрямовані на підвищення безпеки експлуатації споруд. Зарубіжні публікації зосереджуються на впровадженні комбінованих методів вимірювань, які поєднують ГНСС із геодезичними, геофізичними та лазерними технологіями. Такий підхід підвищує точність та надійність результатів, особливо у складних урбанізованих умовах.

Виклад основного матеріалу: У процесі еволюції геодезичної науки сформувався широкий спектр методологічних підходів і технічних засобів, спрямованих на забезпечення якісного геодезичного моніторингу інженерних споруд. Історично першими були апробовані класичні методи вимірювань, які протягом тривалого часу залишалися основним інструментарієм контролю за деформаційними процесами.

Аналіз підходів до геодезичного моніторингу дав змогу класифікувати їх за характером просторових переміщень споруд. Критеріями є вид, інтенсивність, швидкість та вектор деформацій. Умовно виділяють чотири групи: осьові (визначають зміщення точок відносно заданої осі), висотні (фіксують лише вертикальні переміщення), планові (контроль у двох координатах) та просторові (повний тривимірний вектор зміщення).

Найбільшу цінність мають абсолютні методи, які фіксують не лише взаємні, а й інтегральні зміщення точок відносно опорних систем координат. Осьові методики застосовують тоді, коли напрямок деформацій відомий наперед. Найпоширеніший — метод відстаней, що вимірює зміни між закріпленими знаками.

Планові методи охоплюють прямі та зворотні засічки, лінійні й лінійно-кутові побудови, а також комбіновані підходи, які поєднують визначення напрямків, відстаней, кутів та відхилень. Висотні зміщення реперних точок визначаються переважно за допомогою геометричного або тригонометричного нівелювання. У складних умовах спостережень застосовують також гідростатичне та гідродинамічне нівелювання [1].

Для визначення просторових переміщень споруд використовують широкий спектр сучасних інструментальних методів. Серед них — наземне фотограмметричне знімання, лазерне сканування, побудова просторових геодезичних мереж з електронними тахеометрами, застосування глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), а також методи наземної і космічної радарної інтерферометрії. Використання таких технологій дає можливість отримати тривимірну інформацію про об'єкт і забезпечити високу точність оцінки його стабільності.

Складні та відповідальні інженерні споруди потребують комплексного моніторингу відповідно до державних будівельних норм. Основними параметрами просторової стабільності є вертикальні переміщення (осідання, просідання, підйоми), що свідчать про деформації фундаментів, та горизонтальні зміщення, які вказують на відхилення від проєктного положення й особливо важливі для мостів, дамб і висотних будівель.

Як показує таблиця 1, серед усіх методів сучасного геодезичного моніторингу найефективнішими для контролю складних споруд є два: застосування ГНСС-технологій і побудова просторових геодезичних мереж. Вони забезпечують оптимальний баланс точності, економічності й універсальності, що робить їх пріоритетними для діагностики та прогнозування деформацій.

Таблиця 1.

Порівняльна оцінка просторових методів моніторингу інженерних споруд
(розроблено авторами на основі [1])

Метод моніторингу	Розробленість	Надійність	Вартість	Доступність	Автоматизація
Фотограмметричне знімання наземне	Середня	Середня	Низька	Висока	Середня
Лазерне сканування	Висока	Висока	Висока	Середня	Висока
Просторові геодезичні мережі	Висока	Висока	Середня	Середня	Середня
ГНСС-технології	Висока	Висока	Середня	Висока	Висока
Радарна інтерферометрія	Середня	Висока	Висока	Низька	Середня

Сучасне будівництво масштабних об'єктів — висотних будівель, мостів, гідротехнічних споруд — потребує регулярної фіксації їхніх переміщень з високою частотою, іноді з інтервалом у годину. За таких умов традиційні методи моніторингу малоефективні, особливо для протяжних споруд понад кілометр, де необхідний контроль усієї конструкції відносно зовнішньої системи координат.

Оптимальним рішенням є використання ГНСС, ефективність яких у точності та надійності підтверджена численними дослідженнями. Супутникові методи не потребують прямої видимості між пунктами, забезпечують приведення результатів до державних систем координат і вирізняються економічністю. Організація ГНСС-моніторингу базується на диференціальних методах, що визначають прирости координат між пунктами, і потребує щонайменше одного опорного пункту, а для стабільності — трьох.

Координати опорного пункту у геоцентричній системі (X, Y, Z) мають ключове значення, оскільки визначають положення та масштаб мережі. Їх

отримують через диференціальні вимірювання відносно пунктів глобальних і континентальних мереж IGS та EUREF, що забезпечує сантиметрову точність. У практиці моніторингу застосовують статичний метод (Static), прискорений статичний (Rapid Static) або повторні спостереження (Reoccupation).

Методика вибору режиму ГНСС-спостережень визначається насамперед вимогами до точності та швидкістю розвитку деформацій. Статичний метод забезпечує найвищу точність, проте при швидких зміщеннях (30–50 мм/день), характерних для зсувів чи коливань високих конструкцій, достатньо застосовувати прискорений статичний режим (Rapid Static) або RTK [2].

Точність координат задається регресійними моделями, що враховують довжину базової лінії, тривалість спостережень та геометрію супутникової конфігурації:

$$\sigma_{XY} = (a + b \cdot L)^2 + \frac{c}{T \cdot NSV}, \quad (1)$$

$$\sigma_H = (d + e \cdot L)^2 + \frac{f}{T \cdot GDOP}, \quad (2)$$

де σ_{XY} і σ_H – похибки в плані та за висотою; L – довжина базової лінії, T – час спостережень, NSV – кількість супутників, $GDOP$ – геометричний показник точності; a, b, d, e, c, f – параметри приймачів та умов.

Рівняння (1)–(2) відображають технічні параметри сучасних ГНСС-систем і потребують спеціалізованого програмного забезпечення для обробки даних.

Для геодезичного моніторингу найдоцільнішим є відносний метод, що забезпечує найвищу точність у локальних системах координат, де немає потреби в абсолютному позиціонуванні в глобальних референц-системах. У цій схемі один приймач встановлюють на пункті з відомими або умовними координатами, а координати споруди визначають відносно цього опорного пункту (рис. 1).

Статичний режим ГНСС передбачає встановлення приймачів на всі точки з подальшою камеральною обробкою. Хоча одночасне оснащення об'єкта антенами забезпечило б максимальну точність, потреба у зведенні даних та вирівнюванні результатів робить метод непридатним для моніторингу з високою частотою або в режимі реального часу [2].

У разі ідеальних умов спостережень середня квадратична похибка визначення базової лінії відносним методом оцінюється рівнянням

$$\sigma_L = \sqrt{a^2 + \left(\frac{b}{D}\right)^2}, \quad (3)$$

де D – довжина базової лінії, мм.

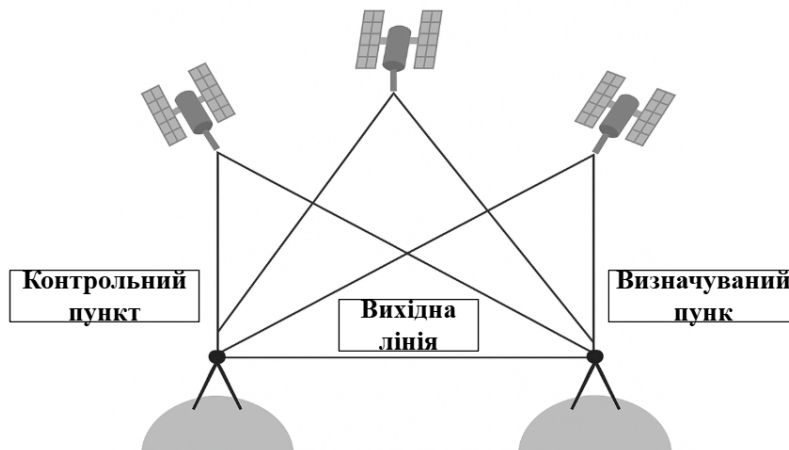


Рис. 1. Структурна схема реалізації відносного методу ГНСС
(розроблено авторами на основі [2])

Відносна похибка у такому випадку подається як

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{D}, \quad (4)$$

що дозволяє оцінити масштабні спотворення у функції довжини.

З огляду на те, що точність ГНСС-вимірювань істотно залежить від довжини базової лінії та тривалості сеансу, для практичних оцінок часто застосовують апроксимовані моделі, рекомендовані Національною геодезичною службою США (NGS) [10]:

$$\sigma_L \approx \sqrt{c^2 + \frac{d^2}{t} + (e \cdot D)^2}, \quad (5)$$

де t – тривалість спостереження, год; c, d, e – емпіричні коефіцієнти, що визначаються NGS і враховують інструментальні та стохастичні фактори.

Розвиток ГНСС-технологій і програмного забезпечення сприяв появі RTK, що забезпечує координати в реальному часі. Хоча його точність нижча за статичні методи, для моніторингу споруд із допустимими переміщеннями 10–15 мм RTK став інноваційним рішенням. Його перевага — висока частота фіксації (до 10 Гц), що дозволяє контролювати об'єкти під динамічними навантаженнями (мости, телевежі, хмарочоси) [3].

Еволюцією став Web RTK (рис. 2), де базова станція через Інтернет передає поправки та приймає координати від роверів. Це підвищує надійність і стабільність контролю в реальному часі.

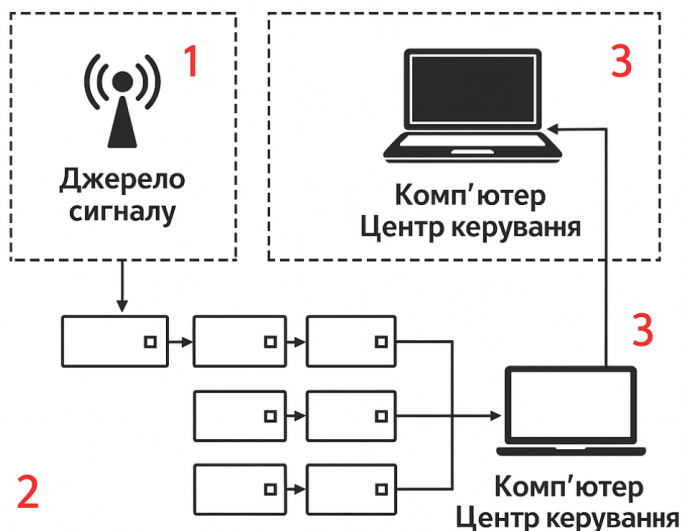


Рис. 2. Принцип організації мережевого моніторингу в системі Web RTK
(розроблено авторами на основі [3])

Запропоновані схеми організації геодезичного моніторингу можуть бути впроваджені будь-якою організацією, що володіє необхідною матеріально-технічною базою. Водночас суттєво складнішим, як у фінансовому, так і в організаційному аспекті, є впровадження систем ГНСС-моніторингу з використанням псевдосупутників (рис. 3).

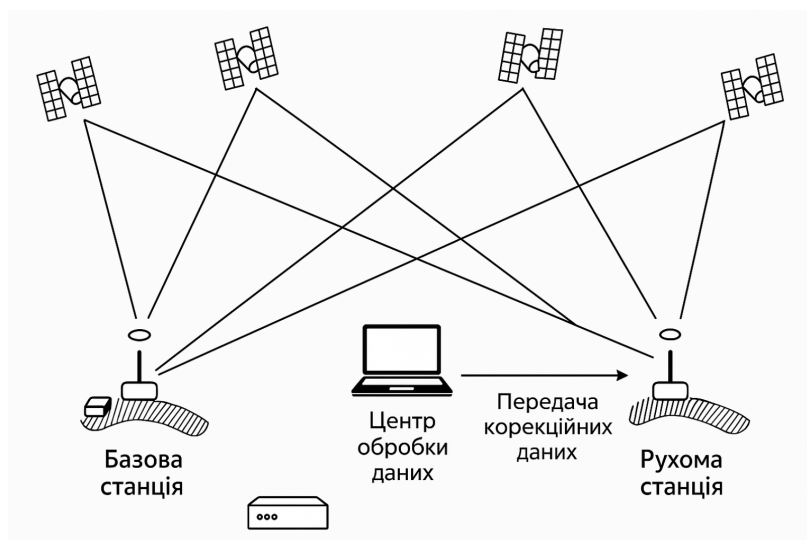


Рис. 3. Структурна конфігурація системи ГНСС-моніторингу із застосуванням псевдосупутників (розроблено авторами на основі [4])

Псевдосупутники являють собою наземний прилад, розташований у точці з відомими координатами, який функціонує за принципом супутника на орбіті, випромінюючи радіосигнал на заданій частоті. ГНСС-приймач сприймає цей сигнал як додаткове джерело інформації з відомим положенням, що суттєво покращує геометрію супутникової конфігурації [5, 6]. Використання

псевдосупутників відкриває можливості для формування різних варіантів моніторингових мереж, які відображені на рисунках 4 та 5.

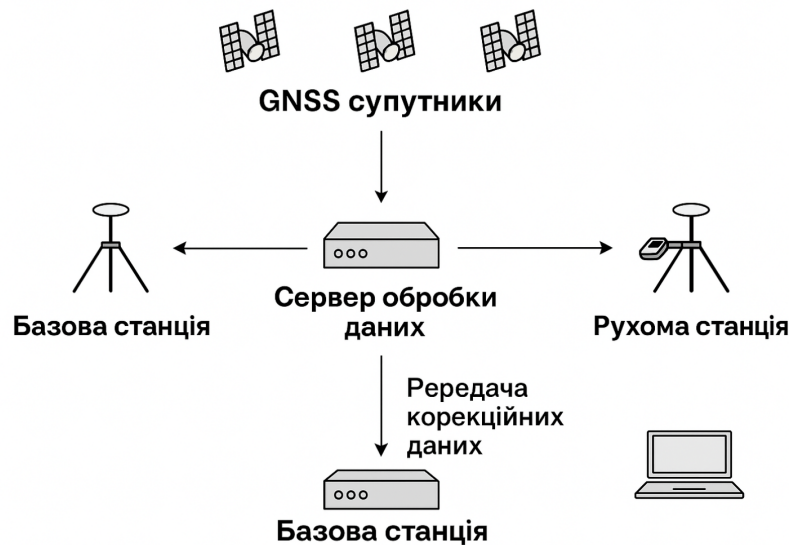


Рис. 4. Структурна схема системи геодезичного моніторингу з використанням псевдосупутників (розроблено авторами на основі [5])

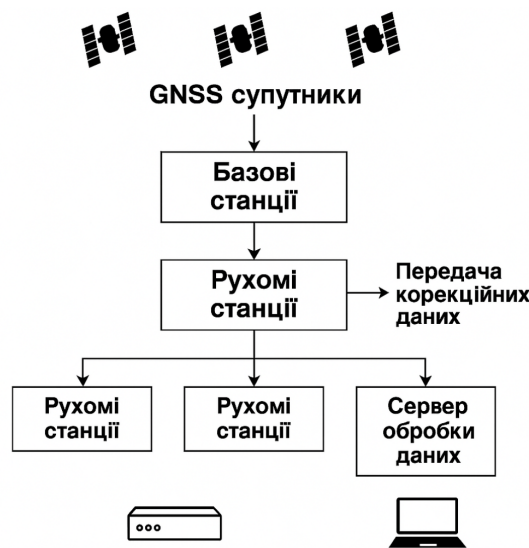


Рис. 5. Модель оберненої конфігурації системи моніторингу із застосуванням псевдосупутників (розроблено авторами на основі [6])

Серед найвідоміших автоматизованих систем геодезичного моніторингу нині вирізняються DC3 (Topcon Positioning, Японія), Leica GeoMos (Leica Geosystems, Швейцарія), Trimble 4D Control (Trimble, США) та універсальна система GOCA (Німеччина). Саме ці компанії визначають напрям розвитку АСГМ, проте на сьогодні доступні відомості здебільшого обмежуються рекламними матеріалами, що не дає змоги об'єктивно оцінити ефективність чи здійснити обґрунтований вибір [7].

Систематизація сучасних можливостей ГНСС-технологій дала змогу сформуванню узагальненої технологічної схеми моніторингу інженерних споруд. Сьогодні ГНСС застосовують як автономне джерело даних або у комбінації з іншими приладами. На цій основі впродовж останнього десятиріччя сформувався новий напрямок інженерної геодезії — автоматизовані системи геодезичного моніторингу (АСГМ) (рис. 6).

Доцільним є аналіз наведених систем моніторингу з огляду на роль та ефективність інтеграції в них ГНСС-технологій. Однією з найбільш показових у цьому аспекті є система Trimble 4D, розроблена американською компанією Trimble, яка загалом відповідає ключовим вимогам сучасних автоматизованих комплексів геодезичного контролю. У структурному відношенні ця система побудована з низки взаємопов'язаних блоків, що ілюструється на рисунку 7 (за матеріалами офіційного сайту компанії Trimble) [8].

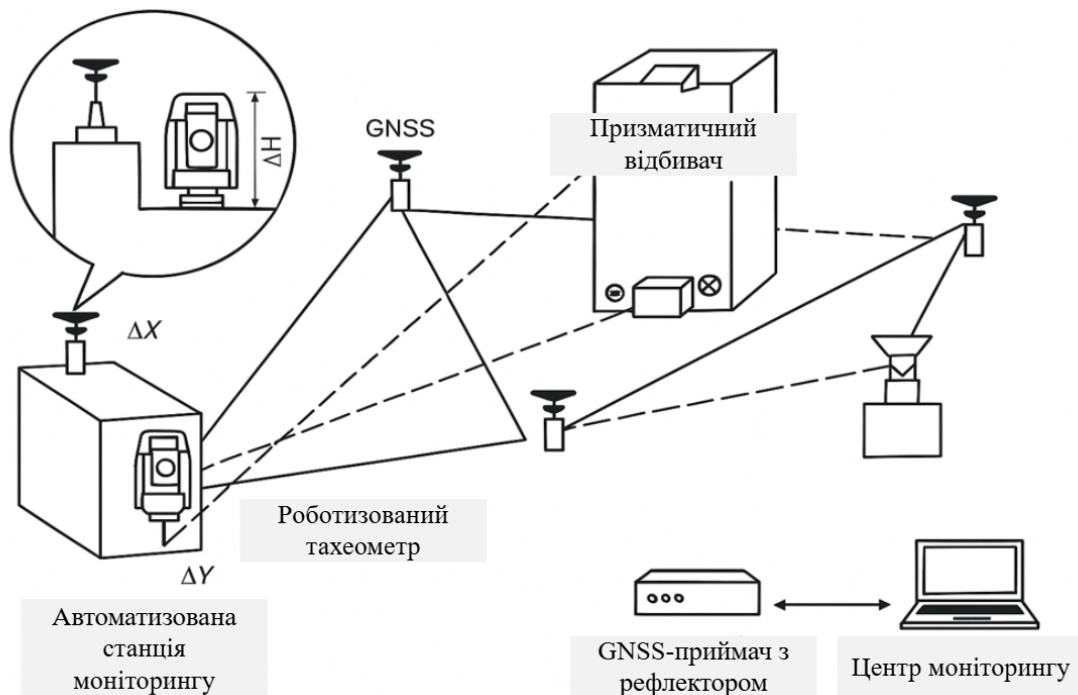


Рис. 6. Структурна модель автоматизованої системи геодезичного моніторингу (розроблено авторами на основі [7])

Оптико-електронні станції розміщують у двох режимах: перманентному - на стаціонарних пілонах для безперервного моніторингу, або тимчасовому - на штативах для короткострокових циклів спостережень.

Trimble 4D Control підтримує кілька режимів: реальний час із мінімальною затримкою, автоматизовану постобробку, комбінований та "сеансовий" із передачею накопичених даних. Система працює переважно з даними ГНСС-приймачів і тахеометрів, тоді як інші сенсори мають допоміжну

роль. Аналітичний блок обмежений, а закритість алгоритмів ускладнює незалежну оцінку точності.

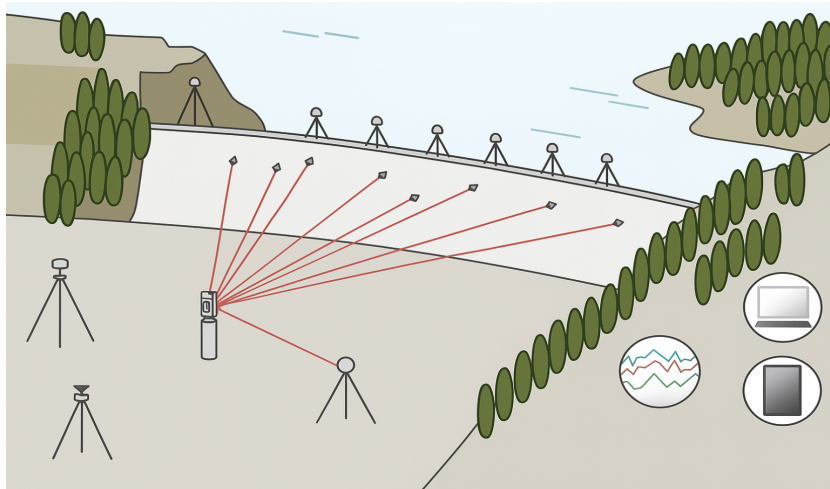


Рис. 7. Структурна модель автоматизованої системи геодезичного моніторингу Trimble 4D(розроблено авторами на основі [8])

DC3Pro пропонується у конфігураціях для різних об'єктів: DC3dam — для дамб, DC3tunnel — для тунелів, DC3rail — для шляхів і мостів, DC3slope — для ґрунтових масивів. DC3mobile STANDARD орієнтований на тахеометри Торсон, забезпечуючи управління проектами, обчислення координат, звітність, фотофіксацію та моніторинг. У версії DC3mobile ADVANCED додано тривимірний аналіз переміщень і сигналізацію у разі деформацій.

Leica GeoMoS — автоматизована система комплексного контролю, що інтегрує геодезичні, геотехнічні та метеорологічні сенсори. Вона поєднує тахеометри, ГНСС-приймачі (з підтримкою Leica GNSS Spider), нівеліри, інклінометри, датчики нахилу, тиску, температури, вологості та спеціалізовані прилади для аналізу причин деформацій і прогнозування змін.

Основні можливості системи охоплюють створення проектів моніторингу з заданою періодичністю, збереження даних у SQL-базі, паралельну роботу з різними сенсорами, вимірювання тахеометрами до 8 км, моделювання метеомереж, розрахунок віртуальних сенсорів, управління подіями, систему сповіщень, а також обмін даними з іншими форматами (ASCII, DXF, Excel).

Програмний комплекс складається з трьох модулів. GeoMoS Monitor керує сенсорами та забезпечує збір і передачу даних у реальному часі. GeoMoS Analyzer виконує камеральну обробку та графічну візуалізацію результатів. GeoMoS Web надає доступ до даних через браузер з будь-якого пристрою. Система вирізняється високим рівнем функціональності, проте її обмеженням є

прив'язаність до обладнання Leica та підтримка лише внутрішніх форматів компанії [9].

Протилежний підхід демонструє компанія VMT (Німеччина), яка створила багатосенсорну систему GOCA (GNSS/LPS/LS-based Online Control and Alarm System). Вона поєднує дані від ГНСС, електронних тахеометрів (LPS), гідростатичних і цифрових нівелірів, а також локальних сенсорів (LS). Спершу розроблена для моніторингу природних катастроф та інженерних споруд, GOCA працює у режимі реального часу, обчислюючи положення, швидкість і прискорення контрольних точок у єдиній тривимірній системі координат.

На основі ГНСС і LPS створюються геодезичні мережі зі стабільної основи та рухомих точок. Обчислення координат здійснюється поетапно: вирівнювання даних, побудова тимчасових рядів з коваріаційною матрицею та паралельний аналіз деформацій. Це дає змогу визначати просторові переміщення, швидкість і прискорення у тривимірній системі координат.

На третьому етапі опрацьовуються дані локальних сенсорів за методами MVE, SHT і KAL або у комплексній інтеграції з інклінометрами, датчиками тиску тощо. Управління сенсорами та передача інформації реалізуються через програмні модулі. Серед особливостей системи: залежність точності обробки ГНСС-вимірювань від стороннього ПЗ, потужний аналітичний блок, що забезпечує інтеграцію різних сенсорів, а також відкрита структура й математичні моделі, ефективність яких підтверджена науковими публікаціями.

Література

1. Яковенко М., Нестеренко О. Огляд видів геодезичного моніторингу будівель і споруд в складних інженерно-геологічних умовах. – Сучасні проблеми архітектури та містобудування. – Київ: КНУБА, 2020. – Вип. 57. – С. 425–432. – [Електронний ресурс].
2. Caldera S., et al. Monitoring of Structures and Infrastructures by Low-Cost GNSS Permanent Stations: A Bridge Case Study. – Journal article. – Basel: MDPI, 2022. – Applied Sciences, Vol. 12, Issue 23. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/23/12468>
3. Hohensinn R. Natural-hazard monitoring with ground-based GNSS. – Journal article. – Amsterdam: Elsevier, 2024. – Developments in Earth Surface Processes, Vol. 26. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065268724000025>
4. Wang G.A methodology for long-term offshore structural health monitoring using GNSS. – Journal article. – London: SAGE, 2024. – Structural

Health Monitoring, Vol. 23, Issue 3. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14759217231169934>

5. Буш В.В., Калугін В.В., Саар А.Н. Геодезичні роботи при будівництві споруд вежового типу. – М.: Недра, 1985. – 216 с.

6. Cazzaniga N.E., Pinto L., Forlani G., Abruzzi P. Monitoring Oscillations of Slender Structures with GPS and Accelerometers // From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 22 – New Measurement Technology and Its Application to Archaeological and Engineering Surveys, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005 pp. 1-15.

7. Kowalska M.E., Zaczek-Peplinska J., Łapiński S., Piasta Ł. Automated Building Monitoring System Based on Reflectorless Measurements: A Case Study of the IMSGeo System. – Journal article. – Basel: MDPI, 2025. – Sensors, Vol. 25, Issue 17. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5327>

8. Erol S., Erol B., Ayan T., Tait M. 1D and 3D Analyses of Deformations in Engineering Structures using GPS and Terrestrial Data. // INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, TS1 – Data Processing, Bratislava, Slovakia, November 11-13, 2004, pp. 1-9.

9. Hamza V., et al. Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring. – Journal article. – Basel: MDPI, 2020. – Sensors, Vol. 20, Issue 18. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7474426>

10. Кузьмін В.І. Геодезичний контроль вертикальності та габаритів ліфтових шахт. // Інженерна геодезія. – 1988. – №31. – С. 35–37.

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor **Roman Demianenko**,

Doctor of Technical Sciences, Professor **Andrii Annekov**,

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor **Yurii Medvedskyi**,

Serhii Nikolaiko,

Kyiv National University of Construction and Architecture

ASPECTS OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF GNSS TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF MODERN GEODETIC MONITORING OF THE CONDITION AND DYNAMICS OF ENGINEERING STRUCTURES

The modern development of the construction industry and engineering infrastructure requires fundamentally new approaches to monitoring the technical condition of structures and predicting their reliability. In the context of increasing

urbanization pressure, climate change, and the intensification of building and structure operation, high-precision positioning technologies, which enable real-time monitoring, acquire particular importance. Among such technologies, global navigation satellite systems (GNSS) play a key role, providing multifunctional tools for the collection, analysis, and interpretation of data on the spatial position of engineering objects. The use of GNSS technologies makes it possible to obtain information on vertical and horizontal displacements, determine the parameters of deformation processes, and create digital models of variable characteristics of engineering systems.

By combining satellite observations with classical geodetic methods and advanced digital data processing algorithms, new horizons open in ensuring the safety and operational reliability of strategic structures—bridges, dams, skyscrapers, and energy complexes. Continuous monitoring observations are of special value, as they allow for the timely detection of deviations from standard parameters and the implementation of preventive measures to avoid emergency situations. Technologies such as RTK (Real-Time Kinematic), PPP (Precise Point Positioning), and integrated GNSS networks form the foundation for creating intelligent systems for managing engineering objects, in line with modern concepts of “smart infrastructure.”

Keywords: GNSS technologies; geodetic monitoring; engineering structures; deformation processes; satellite positioning; digital models; spatial displacements; infrastructure safety.

REFERENCES

1. Yakovenko, M., & Nesterenko, O. (2020). Review of types of geodetic monitoring of buildings and structures in complex engineering and geological conditions. *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, (57), 425–432. Kyiv: KNUBA. [Electronic resource]. Available at: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/bitstreams/e543ced5-cc98-4f51-9f63-84df1eaa587d/download> {in Ukrainian}
2. Caldera, S., et al. (2022). Monitoring of Structures and Infrastructures by Low-Cost GNSS Permanent Stations: A Bridge Case Study. *Applied Sciences*, 12(23). Basel: MDPI. [Electronic resource]. Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/23/12468> {in English}
3. Hohensinn, R. (2024). Natural-hazard monitoring with ground-based GNSS. *Developments in Earth Surface Processes*, 26. Amsterdam: Elsevier. [Electronic resource]. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065268724000025> {in English}

4. Wang, G. (2024). A methodology for long-term offshore structural health monitoring using GNSS. *Structural Health Monitoring*, 23(3). London: SAGE. [Electronic resource]. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14759217231169934> {in English}
5. Bush, V.V., Kalugin, V.V., & Saar, A.N. (1985). Geodetic works in the construction of tower-type structures. Moscow: Nedra. 216 p. {in Ukrainian}
6. Cazzaniga, N.E., Pinto, L., Forlani, G., & Abruzzi, P. (2005). Monitoring Oscillations of Slender Structures with GPS and Accelerometers. From Pharaohs to Geoinformatics FIG Working Week 2005 and GSDI-8, TS 22 – New Measurement Technology and Its Application to Archaeological and Engineering Surveys, Cairo, Egypt, April 16–21, 2005, pp. 1–15. {in English}
7. Kowalska, M.E., Zaczek-Peplinska, J., Łapiński, S., & Piasta, Ł. (2025). Automated Building Monitoring System Based on Reflectorless Measurements: A Case Study of the IMSGeo System. *Sensors*, 25(17). Basel: MDPI. [Electronic resource]. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5327> {in English}
8. Erol, S., Erol, B., Ayan, T., & Tait, M. (2004). 1D and 3D Analyses of Deformations in Engineering Structures using GPS and Terrestrial Data. IN GEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, TS1 – Data Processing, Bratislava, Slovakia, November 11–13, 2004, pp. 1–9. {in English}
9. Hamza, V., et al. (2020). Testing Multi-Frequency Low-Cost GNSS Receivers for Geodetic Monitoring. *Sensors*, 20(18). Basel: MDPI. [Electronic resource]. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7474426> {in English}
10. Kuzmin, V.I. (1988). Geodetic control of verticality and dimensions of elevator shafts. *Engineering Geodesy*, (31), 35–37. {in Ukrainian}