

Корнилій ТРЕТЯК^{1а}, Олександр ЗАЯЦЬ², Володимир ГЛОТОВ³, Михайло НАВОДИЧ⁴,
Іван БРУСАК^{1б}

¹ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ^{1а} <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>, ^{1б} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>

² Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

³ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>

⁴ Навчально-наукова лабораторія “Опрацювання супутникових вимірів”, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СПОРУД ТЕРЕБЛЕ-РІЦЬКОЇ ГЕС

Висвітлено аспекти історичного розвитку моніторингу Теремле-Ріцької ГЕС, які спричинили необхідність переходу до автоматизованої системи геодезичного моніторингу (АСГМ) деформацій напірного трубопроводу та інших споруд ГЕС. З 2018 р. систему автоматизували та розширили її інструментальну частину. У 2022 р. інструментальна частина АСГМ містить три основні компоненти, які забезпечують: лінійно-кутові вимірювання із визначенням метеорологічних параметрів, супутникові ГНСС-вимірювання, п'єзометричні вимірювання. У цій статті з метою моніторингу деформацій викладено результати роботи АСГМ. Наведено також переваги застосування АСГМ порівняно із класичними вимірюваннями, які дають можливість передусім постійного визначення координат у режимі реального часу з підвищенням точності виявлення просторових деформацій до рівня 2 мм (по горизонталі) та 3 мм (по висоті) на площі 2 км². Також передбачено можливість інформувати служби технічного обслуговування об'єкта моніторингу, якщо деформація перевищує встановлені пороги. За результатами часових серій лінійно-кутових вимірювань можна стверджувати, що напірний трубопровід зазнає сезонних зміщень, які проявляються у горизонтальному зміщенні опор у бік будівлі ГЕС із зимового до літнього періоду, і навпаки, зміщуються у бік водосховища від літнього періоду до зимового. Сьогодні для сукупного аналізу лінійно-кутових вимірювань із визначенням метеорологічних параметрів, ГНСС-вимірювань та п'єзометричних вимірювань даних недостатньо. З накопиченням масиву даних важливо встановити взаємозв'язки між цими параметрами.

Ключові слова: автоматизована система моніторингу; моніторинг деформацій; лінійно-кутові вимірювання; ГНСС; п'єзометр; Теремле-Ріцька ГЕС.

Вступ

Будівництво гідроелектростанцій (ГЕС) є активним втручанням у геолого-тектонічні, геодинамічні та гідрологічні умови регіону, що також супроводжується великими переміщеннями водних мас. Це може призвести до активізації деформаційних процесів інженерних споруд і, як наслідок: до загибелі людей, аварій, руйнувань та матеріальних збитків, що особливо важливо через велику тривалість експлуатації ГЕС в Україні [Третяк та ін., 2017; Фаренюк та ін., 2020].

Для ГЕС України створено системи моніторингу зміщень греблі, водосховища та інших споруд, окремі з яких частково чи повністю автоматизовані [Бисовецький та ін., 2011; Третяк та ін., 2017]. Такі системи містять ГНСС-

приймачі, роботизовані електронні тахеометри, прецизійні інклінометри, метеорологічні датчики, телекомунікаційне обладнання тощо. Дослідження моніторингу споруд стосуються як зміщень у реальному часі, так і їх постопрацювання. Для ГЕС на річці Дніпро проаналізовано стійкість пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС [Третяк та ін., 2014], досліджено сезонні деформації греблі Дніпровської ГЕС за даними ГНСС-вимірювань [Tretyak & Palianytsia, 2021], контролюється робота встановлених автоматизованих систем моніторингу [Бисовецький та ін., 2011; Третяк та ін., 2017].

Постійний моніторинг відбувається в межах Дністровського гідровузла: диференційовано

мережу ГНСС-спостережень [Savchyn and Vaskovets, 2018], визначено взаємозв'язок побудови ГАЕС та сейсмічності регіону [Savchyn and Pronyshyn, 2020], диференційовано кінематику греблі ГЕС-1 [Третяк та ін., 2021] та виявлено взаємозв'язок висотних зсувів ГНСС-пунктів, зумовлений неприпливними атмосферними навантаженнями [Tretyak et al., 2021]. Також реалізовано комплексний підхід до оброблення даних у єдиному центрі для збереження та візуалізації результатів Дніпровської, Дністровської, Середньодніпровської та Канівської ГЕС [Третяк та ін., 2017].

Система моніторингу деформацій згаданих вище ГЕС є індивідуальним рішенням для кожної станції, враховуючи конструктивні особливості об'єкта та інженерно-геологічні умови регіону. Низка проведених упродовж останнього десятиліття досліджень тільки підтверджує актуальність моніторингу. Водночас важливий перехід до повністю автоматизованих систем геодезичного моніторингу (АСГМ).

АСГМ складається з трьох частин [Behr, et al., 1998; Barzaghi, et al., 2018; Могильный и др., 2010; Zayats, et al., 2021]:

- 1) інструменти;
- 2) засоби зв'язку;
- 3) програмне забезпечення

Інструментальна частина містить: високоточну геодезичну контрольну мережу, що складається з реперів, які періодично контролюються спеціальним геодезичним обладнанням, таким як: приймачі ГНСС, електронні тахеометри, відбивачі, нахиломіри, цифрові рівні, метеорологічні та інші геотехнічні датчики.

Комунікаційні засоби – комутатори, інтерфейси використовують для завантаження в режимі реального часу інформації з інструментальної частини АСГМ та її передавання на сервер для подальшого оброблення та інтерпретації.

Програмне забезпечення складається із таких підсистем: збирання даних датчиків, оброблення даних, аналіз і звіт. Основним призначенням програмної частини АСГМ є збирання і комбіноване оброблення усіх доступних вимірювань з метою виявлення деформацій. Також ця система автоматично інформує відповідальних осіб, коли деякі із контрольованих параметрів виходять за встановлені порогові значення.

У цій статті описано створення АСГМ напірного трубопроводу Теребле-Ріцької ГЕС, основною метою якої є визначення координат у режимі реального часу, підвищення точності вимірів та можливість інформування служби технічного обслуговування ГЕС про потенційні руйнування.

Попередні дослідження Теребле-Ріцької ГЕС

Теребле-Ріцька ГЕС – це унікальна гідроелектростанція дериваційного типу, розташована в Хустському районі Закарпатської області. Вона є частиною потужного енергетичного комплексу, так званого “Бурштинського острова”, який діє на території Закарпатської, Львівської та Івано-Франківської областей. Потужність ГЕС 27 МВт, щорічне виробництво електроенергії в середньому (залежно від рівня води в річках) 123 млн кВт-год. Після спорудження греблі виникло Вільшанське водосховище об'ємом 23,7 млн м³, площа водного дзеркала – 1,6 км². Загальний вигляд на аерофотознімку та фото напірного трубопроводу Теребле-Ріцької ГЕС подано на рис. 1.



Рис. 1. Загальний вигляд на аерофотознімку та фото напірного трубопроводу Теребле-Ріцької ГЕС

Для побудови ГЕС у 1949–1955 рр. використано особливості розташування: річки Теребля і Ріка течуть на віддалі одна від одної 4 км, але Теребля – на 200 м вище від Ріки. Між річками споруджено дериваційний тунель завдовжки 3,7 км, яким води річки Тереблі через ГЕС скидаються у басейн річки Ріка. Таке рішення потребує особливого підходу як до звичайного моніторингу просторових зміщень споруд Теребле-Ріцької ГЕС, так і до його автоматизації.

Теребле-Ріцьку ГЕС введено в експлуатацію у 1956 р., а геодезичні спостереження за зміщеннями анкерних опор напірного трубопроводу здійснюються з 1958 р. [Демедюк та ін., 1993]. До 1989 р. використовувана методика давала змогу визначати лише горизонтальні зміщення напірного трубопроводу. Для визначення комплексних деформацій напірного трубопроводу Теребле-Ріцької ГЕС у 1989 р. створено спеціальну просторову геодезичну мережу (рис. 2).

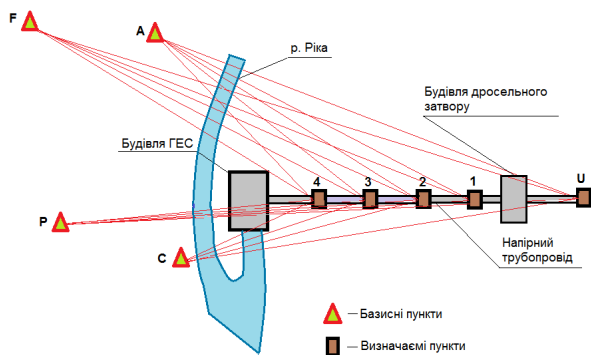


Рис. 2. Схема просторової мережі трилатерації Теребле-Ріцької ГЕС [Демедюк та ін., 1993; Tretyak, et al., 2010]

Визначення деформацій виконано методом трилатерації, а починаючи з 45-го циклу (5.2000 р.), – методом супутникової геодезії за допомогою ГНСС-вимірювань. За період з 5.1989 р. до 8.2017 р. виконано 67 циклів спостережень. Вимірювання виконували ГНСС-приймачами Leica SR-1200, Trimble R7 у статичному режимі збирання ГНСС-даних та прецизійним електронним тахеометром TCRP 1201 (Leica).

Для оцінювання деформацій використано компоненти g_x, g_y, g_z – відносних зміщень за кожною із осей X, Y, Z і загального зміщення та Δ -дилатації (стиску або розтягу) [Грицюк, 2010; Tretyak, et al., 2010]. Виділяються короткоперіодичні деформації, які залежать від коливання рівня води у водосховищі, та довготривалі деформації, які є наслідком перших. Внаслідок циклічних деформацій (стиску – розтягу) та у зв'язку із частковим заповненням тріщин солями та карбонатами, які випадають з водного розчину, виникає загальне зміщення геодезичних пунктів на трубопроводі [Кульчицький 2009; Третяк, та ін., 2009]. Зона ГЕС розташована на віддалі близько 16–18 км на північний схід від

зони сейсмоактивного Закарпатського глибинного розлому (сутури) і на віддалі приблизно 28–30 км від зони зчленування його із також сейсмоактивним Оашським меридіональним розломом Закарпатського прогину. За результатами сейсмологічних досліджень на заході району простежена субмеридіональна глибинна (з вогнищами землетрусів до глибини 38–52 км) сеймотектонічно активна зона контакту терейнів Алькапа і Тися-Дакія у Карпатському регіоні України [Назаревич та ін., 2016]

У результаті виконання чергової оцінки деформацій регіону встановлено, що у серпні 2017 р. на прогоні D-1, який відповідає зоні стику дериваційного тунелю і напірного трубопроводу, стиснення становило $-18,97 \times 10^{-4}$, а навантаження $-0,0047 \times 10^5$ мПа, за критичного значення $P = 0,0223 \times 10^5$ мПа.

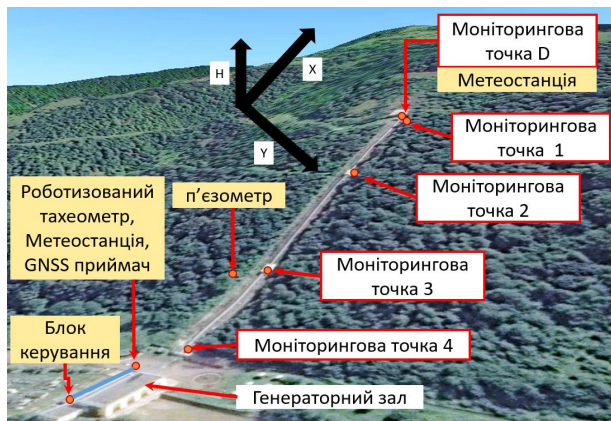
Зважаючи на виявлені деформації, з метою забезпечення стійкості напірного трубопроводу потрібно змінити схему вимірювань так, щоб у майбутньому повністю автоматизувати процес та у реальному часі фіксувати деформації структур.

Мета

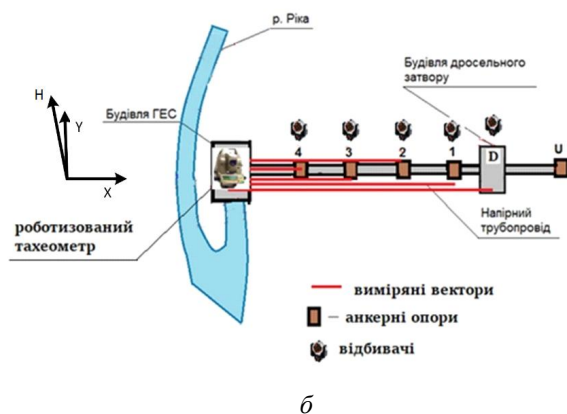
Мета статті – показати особливості впровадження та переваги АСГМ напірного трубопроводу Теребле-Ріцької ГЕС над старою системою, зокрема можливість використання різних датчиків, які з накопиченням даних дозволять ефективніше здійснювати моніторинг об'єкта та отримувати результати у режимі реального часу.

Автоматизована система геодезичного моніторингу напірного трубопроводу

У вересні 2018 р. створено принципово нову АСГМ напірного трубопроводу Теребле-Ріцької ГЕС (рис. 3). Зазначимо, що встановлені призми-відбивачі нової системи зміщені від пунктів попереднього моніторингу, але фізично здійснюється моніторинг тих самих пілонів геодезичної мережі напірного трубопроводу, які, по суті, демонструють ті самі фізичні зміщення як для старої, так і для нової системи. Приведення нових даних до попередньо визначених за потреби здійснюється через урахування відповідної поправки між центрами моніторингових пунктів.



а



б

Рис. 3. Розташування моніторингових точок АСГМ напірного трубопроводу Тербле-Рицької ГЕС на фото (а) та схематично (б) [Zayats, et al., 2021]

У 2022 р. інструментальна частина АСГМ містить три основні компоненти, які є повністю автоматизованими і виконують:

- 1) лінійно-кутові вимірювання із визначенням метеорологічних параметрів;
- 2) ГНСС-вимірювання;
- 3) п'єзометричні вимірювання (зміна рівня поверхневих вод).

Програмне забезпечення автори розробили на платформі Lazarus та реалізували на мікрокомп'ютері Raspberry PI 3 [Zayats et al., 2021].

Підсистему оброблення даних реалізовано за допомогою таких програмних блоків:

- Аналіз і фільтрація – спеціальний блок, який відхиляє вимірювання, що містять грубі помилки та викиди.
- Поправки для метеорологічних параметрів – спеціальна підпрограма, яка обчислює поправки до геодезичних вимірювань для температури, тиску та вологості атмосфери протягом часу спостереження.

- Комбіноване регулювання – уніфікована програма, яка виконує комбіноване налаштування ГНСС та електронного тахеометра і забезпечує оцінювання точності після налаштування.

Лінійно-кутові виміри

На рис. 4 наведено встановлений на даху машинного залу роботизований тахеометр LEICA TPS1000. Для мінімізації впливу навколишнього середовища тахеометр накрито спеціальним захисним ковпаком, покритим ізоляційним матеріалом



Рис. 4. Роботизований тахеометр LEICA TPS1000 із захисним ковпаком, встановлений на даху машинного залу

Відбивачі встановлено на анкерних опорах і будівлі дросельного затвору. На рис. 5 зображено відбивач, закріплений на анкерній опорі із захисним ковпаком.



Рис. 5. Відбивач із захисним ковпаком, закріплений на анкерній опорі

АСГМ підключена до мережі інтернет і у режимі реального часу передає результати повторних вимірювань на сервер. Програмне забезпечення, встановлене на сервері, виконує опрацювання вимірів і обчислює параметри деформацій напірного трубопроводу. Частота повторних серій вимірювань 6 год. Точність вимірювання кутів 0,5–1", віддалей 2 мм. Одна серія вимірювань передбачає шість вимірювань кутів і віддалей до кожного відбивача. У кожній серії з усіх вимірювань на кожний відбивач обчислюється середнє значення вертикального та горизонтального напрямку і похила віддаль. На основі цих результатів для кожної серії визначають координати усіх відбивачів. Початком системи координат є центр тахеометра.

З метою врахування оптичної рефракції встановлено дві метеостанції із температурним градієнтнометром – безпосередньо біля тахеометра на будівлі ГЕС та на пункті D на дросельному затворі (рис. 6).



Рис. 6. Метеостанції із температурним градієнтнометром на будівлі ГЕС та на дросельному затворі

Метеостанція-градієнтнометр за допомогою датчика ВМЕ280 забезпечує автоматизоване збирання даних температури, градієнта температури на базисі 2 м по висоті, тиску та вологості й передавання цих даних на сервер для подальшого опрацювання.

Дані вимірювання атмосферного тиску, температури та градієнта температури у режимі реального часу разом із даними вимірювань роботизованого тахеометра передаються на центральний сервер Львівської політехніки. Спеціально розроблене програмне забезпечення розраховує поправку у виміряні кути та віддалі. Після введення поправок виконується опрацювання

лінійно-кутових вимірів, обчислюються на кожну епоху вимірювань просторові координати відбивачів та їх зміщення і визначаються параметри деформацій напірного трубопроводу.

Часові серії зміщень за координатами X, Y, H (розташування осей див. рис. 3) пунктів 1, 2, 3, 4, D подано на рис. 7.

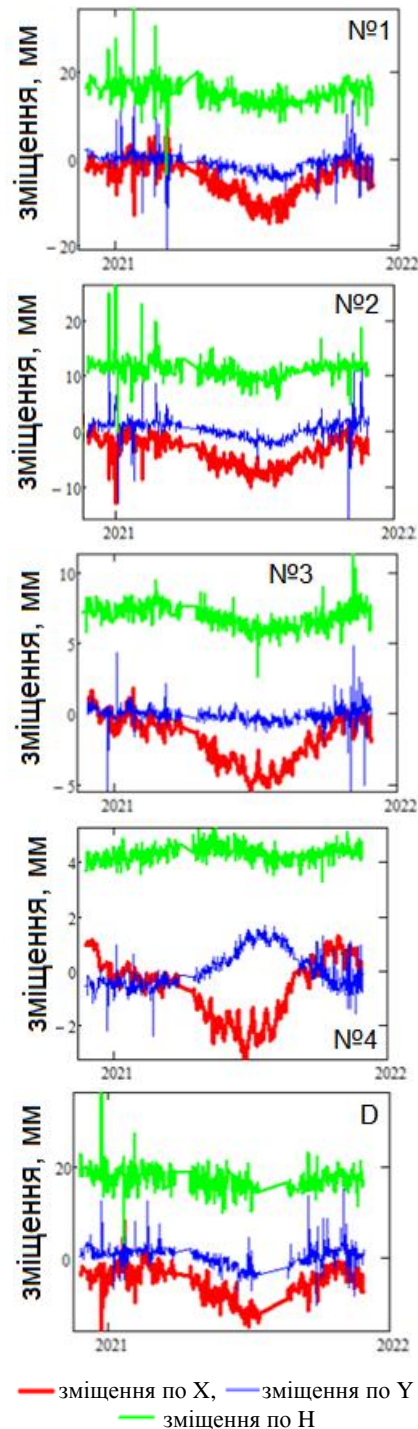


Рис. 7. Часові серії зміщень по координатах X, Y, H пунктів 1, 2, 3, 4, D (розташування осей див. рис. 3)

За результатами часових серій можна стверджувати, що напірний трубопровід зазнає сезонних зміщень, які проявляються у горизонтальному зміщенні опор у бік будівлі ГЕС від зимового до літнього періоду, і навпаки, зміщуються у бік водосховища із літнього періоду до зимового. У перпендикулярному напрямку до тіла трубопроводу дросельний затвор та анкерні опори № 1, 2, 3 зміщуються вправо від трубопроводу з літнього періоду до зимового, а анкерна опора № 4, навпаки, вліво від трубопроводу. З літнього періоду до зимового анкерні опори змінюють напрям руху на протилежний. У висотному плані практично усі анкерні опори просідають влітку, і навпаки, повертаються в початкове положення взимку (див. рис. 1, 3).

За вказані періоди спостережень максимальну деформацію зафіксовано на прогоні D-1 між дросельним затвором і пунктом 1. За період від листопада 2020 до жовтня 2021 р. максимальний стиск трубопроводу на цьому прогоні досягав -165×10^{-5} . Це свідчить про те, що екстремальні напруження істотно зростають з часом. Крім цього, встановлено, що у травні – червні 2021 р. незначного стискання зазнали усі прогони напірного трубопроводу у межах -10×10^{-5} , однак у цей час на прогоні D-1 стискання не було. На цьому прогоні зафіксовані сезонні коливання деформацій, однак за весь період спостережень стискання цього прогону зростає у часі, що свідчить про тектонічні навантаження та зміну гідрогеологічного стану Рікського схилу. Оскільки довжина прогону майже 10 м, то максимальне стискання прогону за весь період спостережень – майже 16 мм. Середня швидкість його максимального зростання 0,6 мм/рік. Навантаження за рахунок деформації за весь 30-річний період спостережень становить $-0,0087 \times 10^5$ мПа, за критичного значення $P = 0,0223 \times 10^5$ мПа.

Супутникові ГНСС-вимірювання

З метою доповнення мережі моніторингу на даху машинного залу встановлено перманентну ГНСС-станцію TERE, яка входить у мережу Geoterrace і розташована на віддалі близько 20 м від тахеометра. Станція обладнана антеною фірми Trimble та приймачем Novatel OEM-V3. Налаштовано передавання даних на сервер, де зберігаються дані лінійно-кутових вимірювань.

Супутникові ГНСС-вимірювання широко використовуються для моніторингу [Третяк та ін., 2017; Sokoła-Szewiоła and Siejka, 2021]

Станцію встановлено у 2021 р. На рис. 8 показано її вигляд, а на рис. 9 – часову серію висотної складової ГНСС-станції TERE. ГНСС-станція – пункт моніторингу електронним тахеометром.



Рис. 8. Перманентна ГНСС-станція TERE:
1 – ГНСС-антена; 2 – призма-відбивач

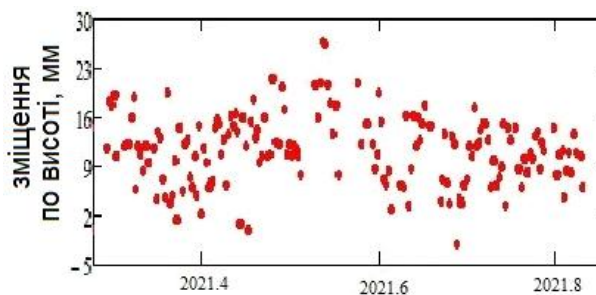


Рис. 9. Часова серія висотної складової ГНСС станції TERE

Вимірювання змін рівня води

Під час побудови Теремле-Ріцької ГЕС у різних ділянках схилу закладено свердловини для вимірювання рівня зміни поверхневих вод, проте ці вимірювання здійснюються механічним способом і з регулярністю раз на декілька днів. Встановлено, що рівень поверхневих вод корелює зі зміщеннями на поверхні, зокрема за даними ГНСС-вимірювань [Munekane, 2004]. Оскільки між річками Теремля та Ріка перепад висот становить 200 м, то і в різних місцях схилу рівень ґрунтових вод відрізнятиметься. Найважливішим є визначення змін рівня ґрунтових вод, адже саме зміни спричиняють деформації на поверхні. Також важливо виконувати такий

моніторинг у реальному режимі та з достатньою точністю.

Для цих завдань використано п'єзометричний датчик HDL300, який закріплений у свердловині апаратною частиною нижче від рівня ґрунтових вод (рис. 10).



Рис. 10. П'єзометричний датчик HDL300

Налаштовано постійне живлення п'єзометра та передавання даних на сервер. Опрацювання даних дає змогу в реальному часі отримувати картину зміни рівня ґрунтових вод у цій ділянці. На рис. 11 показано часову серію зміни рівня ґрунтових вод у свердловині. Піки, виділені синіми колами, пов'язані із технічними роботами спуску – випуску води на станції, їх підтверджує персонал ГЕС.

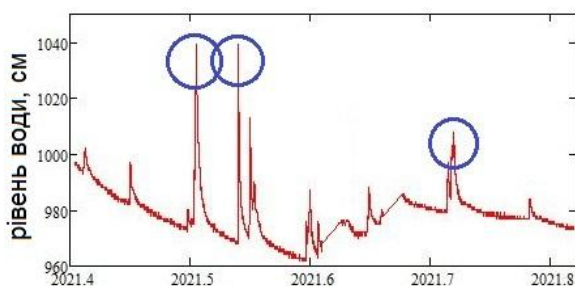


Рис. 11. Часова серія зміни рівня води за автоматизованим п'єзометром

Порівнюючи часові серії зміни рівня води у свердловині та зміни висоти антени ГНСС-станції, бачимо, що пониження рівня води відповідає підйому ГНСС-станції і, навпаки, підвищення рівня води супроводжується просіданням ГНСС-станції. Для підтвердження та пояснення цих

змін потрібно накопичити триваліші результати вимірювань.

Висновки

Геодезичний моніторинг за зміщеннями анкерних опор напірного трубопроводу Тербле-Ріцької ГЕС триває із 1958 р. Спочатку деформації вимірювали методами триангуляції, а з 2000 р. – за допомогою ГНСС. В останні десятиліття застосовували цикли лінійно-кутових вимірювань за допомогою високоточних тахеометрів. З метою підвищення регулярності та точності вимірювань із 2018 р. систему автоматизували.

Сьогодні АСГМ містить три основні компоненти, які повністю автоматизовані і забезпечують: лінійно-кутові вимірювання із визначенням метеорологічних параметрів, ГНСС-вимірювання, вимірювання зміни рівня ґрунтових вод. Інформацію збирають та через мережу інтернет передають до центру управління у Львівській політехніці.

Значущими є основні переваги розробленої системи АСГМ:

- Зменшення витрат на апаратне обладнання за рахунок оптимізації АСГМ.
- Можливість інтеграції в обладнання АСГМ від різних виробників.
- Економія праці за рахунок високої автоматизації системи. Мінімізація втручання людини в систему.
- Підвищення точності результатів геодезичних вимірювань за рахунок фільтрації та відхилення грубих похибок і введення метеорологічних поправок.
- Підвищення точності виявлення просторових деформацій до рівня: 2 мм (по горизонталі) та 3 мм (по висоті) на площі 2 км² за рахунок комбінованого регулювання.
- Можливість визначення координат у режимі реального часу.
- Зменшення часу оброблення даних за рахунок оптимізації АСГМ.
- Можливість інформувати служби технічного обслуговування об'єкта моніторингу, коли деформація перевищує встановлені пороги.

За результатами часових серій лінійно-кутових вимірювань можна стверджувати, що напірний трубопровід зазнає сезонних зміщень, які

проявляються у горизонтальному зміщенні опор у бік будівлі ГЕС від зимового до літнього періоду, і, навпаки, у бік водосховища із літнього періоду до зимового.

Сьогодні для сукупного аналізу лінійно-кутових вимірювань із визначенням метеорологічних параметрів ГНСС-вимірювань та п'езометричних вимірювань даних недостатньо. З накопиченням масиву даних важливо буде встановити взаємозв'язки між цими параметрами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Бисовецький Ю. А., Третяк К. Р., Щучик Э. С. Автоматизация геодезических наблюдений за гидротехническими сооружениями гидроэлектростанций УкрГидроенерго. *Гідроенергетика України*, 2021. Вип. 2. С. 45–51.
- Грицюк Т. Ю. Геодезичний моніторинг короткоперіодичних зміщень напірних трубопроводів гідроенергетичних об'єктів (на прикладі Теребле-Ріцької ГЕС): дис. канд. техн. наук: спец. 05.24.01 “Геодезія, фотограмметрія та картографія”, 2010.
- Демедюк М., Сідоров І. С., & Третяк К. Р. Вплив Рікського тектонічного розлому на деформації напірного трубопроводу Теребля-Рікської ГЕС. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 1993. Вип. 55. С. 14–22. <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-55-1993/influence-ric-tectonic-fractures-deformation>
- Кульчицький А. Структурно-геологічні особливості території Теребле-Ріцької ГЕС та оцінка їх впливу на деформації дериваційного трубопроводу геологічними та геодезичними методами. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2009. Вип. II(18). С. 44–48. http://vlp.com.ua/files/11_69.pdf
- Могильный С. Г. Шоломицкий А. А., Пригаров В. А. Автоматизированная система геодезического мониторинга. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2010. Вип. (I)19. С. 193–197. <https://vlp.com.ua/taxonomy/term/3164?page=1>
- Назаревич А., Назаревич Л., Шлапінський В. (2016). Сейсмічність, геологія, сейсмотектоніка і геодинаміка району Теребле-Ріцької ГЕС (українське Закарпаття). *Геодинаміка*, (1), 170–192. <https://doi.org/10.23939/jgd2016.01.170>
- Третяк К. Р., Савчин І. Р., Заяць О. С., Голубінка Ю. І., Ломпас, О. В. та Бисовецький Ю. (2017) Встановлення та супровід автоматизованих систем контролю просторових зміщень інженерних споруд українських гідроелектростанцій. *Гідроенергетика України*, 1–2, 33–41. <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2018-08/8.pdf>
- Третяк К., Корлятович Т., Брусак І., Смірнова О. (2021) Диференціація кінематики греблі Дністровської ГЕС-1 (за даними ГНСС-моніторингу просторових зміщень). *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Вип. 42. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.33841/1819-1339-2-42-57-66>
- Третяк К., Кульчицький А., Сідоров І. Геодинаміка Теребле-Ріцького техногенного полігону. *Геодинаміка*. 2009. Вип. 1(8), С. 47–52. <https://doi.org/10.23939/jgd2009.01.047>
- Tretyak, K., & Palianytsia B. (2021). Research of seasonal deformations of the Dnipro HPP dam according to GNSS measurements. *Geodynamics*, 1(30), 5–16. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.005>
- Третяк К., Петров С., Голубінка Ю., Аль-Алусі Ф. Аналіз стійкості пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2014. Вип. 80. С. 5–19. <https://science.lpnu.ua/istcgcap/all-volumes-and-issues/volume-80-2014/analysis-stability-points-automated-geodetic>
- Фаренюк Г., Вайнберг О., Шумінський В. Надійність та безпека гідротехнічних споруд Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС. *Наука та будівництво*, 2020. Вип. 25(3). С. 3–12. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v25i3.1Barzaghi>
- R., Cazzaniga, N. E., De Gaetani, C. I., Pinto, L., & Tornatore, V. (2018). Estimating and comparing dam deformation using classical and GNSS techniques. *Sensors*, 18(3), 756. <https://doi.org/10.3390/s18030756>
- Behr, J. A., Hudnut, K. W., & King, N. E. (1998, September). Monitoring structural deformation at Pacoima dam, California using continuous GPS. In *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1998)*, 59–68. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=2934>
- Munekane, H, Tobita, M., Takashima, K. (2004). Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan. *Geophys Res Lett.*, 31(12). <https://doi.org/10.1029/2004GL020158>
- Savchyn, I., & Pronyshyn R. (2020). Differentiation of recent local geodynamic and seismic processes of technogenic-loaded territories based on the example of Dniester Hydro Power Complex (Ukraine). *Geodesy and Geodynamics*, 11(5), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.06.001>
- Savchyn, I., & Vaskovets, S. (2018). Local geodynamics of the territory of Dniester pumped storage power plant. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 15(1), 41–47. <http://dx.doi.org/10.13168/AGG.2018.0002>

- Sokoła-Szewiła, V., & Siejka, Z. (2021). Validation of the accuracy of geodetic automated measurement system based on GNSS platform for continuous monitoring of surface movements in post-mining areas. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 112(1), 47–57. <https://sciendo.com/it/article/10.2478/rgg-2021-0007>
- Tretyak, K., Brusak, I., Bubniak, I., & Zablotskyi, F. (2021). Impact of non-tidal atmospheric loading on civil engineering structures. *Geodynamics*, 2(31), 16–28. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.016>.
- Tretyak, K., Grytsyuk, T., Dvulit, P., & Babiy, L. (2010). Application of geodetic methods for monitoring of stresses of penstock on Tereblya-Rikiska hydropower station. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, (11), 135–149. <https://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.dl-catalog-3d582503-5092-4bce-8faf-142bd08ab088>.
- Zayats, O. S., Tretyak, K. R., Smirnova, O. M., & Tserklevych, A. L. (2021, November). Development and implementation of automated system of geodetic monitoring on Tereble-Rikiska HPP for structural control of engineering constructions. In *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Vol. 2021, No. 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2089>.

Kornyliy TRETAK^{1a}, Olexandr Zayats², Volodymyr HLOTOV³, Mykhailo NAVODYCH⁴, Ivan BRUSAK^{1b}

¹ Department of High Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, ^{1a} <https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>, ^{1b} <https://orcid.org/0000-0001-5434-4931>

² Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

³ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>

⁴ Educational and Scientific Laboratory “Processing of satellite measurements”, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

ESTABLISHMENT OF THE AUTOMATED SYSTEM OF GEODETIC MONITORING FOR STRUCTURES OF TEREBLE-RITSKA HPP

The article presents aspects of the historical development of monitoring of Tereble-Ritska hydroelectric power station (HPP), which led to the need of establishment an automated system of geodetic monitoring (ASGM) of deformations of the water pipeline and other structures. Since 2018, the system has been automated and the instrumental part continues to be expanded. Thus, as of 2022, the instrumental part of ASGM includes 3 main components, namely: linear-angular measurements with determination of meteorological parameters, satellite GNSS measurements, piezometric measurements. This article presents the results of ASGM work in order to monitor deformations. There are also some advantages of using ASGM in comparison with classical measurements, which first of all allow to determine coordinates in real time, increase the accuracy of spatial deformation detection to 2 mm (horizontal) and 3 mm (height) on an area of 2 km². It is also possible to inform the maintenance services of the monitored object when the received deformation exceeds the established limits. According to the results of time series of linear-angular measurements, it can be stated that the pipeline undergoes seasonal displacements which are manifested in horizontal displacement of supports towards the HPP building from winter to summer, and vice versa from summer to winter. To date, the amount of special data for the aggregate analysis of linear-angular measurements with the determination of meteorological parameters, GNSS measurements and piezometric measurements is insufficient. As data accumulates, it will be important to establish relationships between these parameters.

Key words: automated system of geodetic monitoring; deformation monitoring; linear-angular measurements; GNSS; piezometer; Tereble-Ritska HPP.

Надійшла 10.03.2022 р.