

Андрій ЗИГАР

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна, ел. пошта: zuggarandrei@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3882-8829>

ЗАСТОСУВАННЯ КРОС-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ФУР'Є ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ КОЛИВАНЬ ҐРУНТУ В ПРИРОДНО-ТЕХНІЧНІЙ ГЕОСИСТЕМІ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС

Основна мета дослідження полягає у виявленні залежності між змінами рівня води та деформацією ґрунту, де девіатором напружень є циклічна зміна навантажень на ложе резервуара водосховища, тобто резервуар ГАЕС виконує роль осцилятора поперечних коливань, а ґрунтовий екстензометр – функцію зчитування та фіксації цих коливань. Методика. Для вирішення завдання потрібно: записати часовий ряд коливань рівня води та часовий ряд коливань датчиків екстензометрів на всіх горизонтах заглиблення, виконати швидке перетворення Фур'є для коливань рівнів води окремо й аналогічно коливань кожного із датчиків екстензометра; розрахувати спектр потужності сигналів окремо всіх датчиків у ґрунті. Зіставити амплітудно-частотні, фазово-частотні складові спектрів потужності коливань рівня води та вертикальних коливань екстензометричних датчиків. Результати. Під час досліджень встановлено, що водосховище ГАЕС є джерелом генерації низькочастотних коливань у широкому спектральному діапазоні. У цих коливань дуже довга хвиля, вимірювана десятками тисяч кілометрів, які можуть поширюватися на великі відстані як по фронту геологічних шарів, так і вглиб. Наукова новизна. Дослідження, висвітлені в статті, дають змогу точніше оцінити частотний спектр коливань і визначити можливі резонансні явища, що можуть виникати в ґрунтах під час роботи енергооб'єкта. Крім того, це дослідження здійснено в конкретному регіоні, що дає змогу отримати точніші дані про вплив низькочастотних коливань на геосистему в цьому регіоні. Отже, це дослідження може становити інтерес для фахівців у галузі геотехніки, геології та енергетики, а також може бути використане під час планування та експлуатації інших енергооб'єктів у подібних умовах. Практична значущість. Низькочастотні хвилі можна виявити за допомогою сейсмічних приладів, таких як сейсмометри. Результати цього дослідження допоможуть коригувати аналіз та інтерпретацію сейсмограм, що важливо для розуміння процесів, які відбуваються у зоні експлуатації гідроелектростанції.

Ключові слова: оолітовий вапняк; геотехнічний моніторинг; екстензометр; гідроакumuлююча електростанція; ґрунтова основа; стан ґрунту; спектральна щільність; швидке перетворення Фур'є.

Вступ

Проблема, розглянута у цій науковій статті, полягає у необхідності вивчення взаємодії гідротехнічної споруди із ґрунтовими основами, на яких вони розташовані, а також у пошуку методів, що дають змогу визначити характеристики цих взаємодій, їхній вплив на геосистему загалом. Актуальність теми зумовлена тим, що людство на сучасному рівні розвитку потребує дешевих та відновлюваних джерел енергії, таких як гідроенергетика. Саме Дністровська гідроакumuлююча електростанція є унікальним зразком серед об'єктів дослідження. Побудована в складних інженерно-геологічних умовах, що характеризуються великим перепадом висот та крутими схилами [Sidorov, et al., 2015]. Під час будівництва Дністровської ГАЕС здійснено доволі серйозні техногенні втручання у сформовану природну структуру масиву, а також у процеси, що в ньому відбуваються. Цикліч-

ність роботи станції призводить і до додаткового техногенного навантаження, а також до зміни гідродинамічного режиму [Sidorov, et al., 2015]. Це не в останню чергу впливає на напружено-деформаційний стан ґрунтів, розташованих в основі конструктиву [Zyhar et al., 2021]. Тому важливо мати надійні дані про можливі наслідки впливу від експлуатації енергетичного об'єкта на геосистему загалом та процеси, які відбуваються в ґрунтах зокрема. Задля глибшого розуміння проблеми впливу зміни рівня води на деформацію ґрунту під час експлуатації гідротехнічних споруд важливо звернутися до результатів досліджень, висвітлених у раніше опублікованих працях. Логічним продовженням розкриття теми є стаття [Zyhar et al., 2021], в якій автори досліджують зміну напружено-деформаційного стану конструктиву після заповнення резервуара водосховища, використовуючи покази дистанційних інклінометрів, які фіксують

горизонтальні деформації в ґрунті, що своєю чергою свідчить про наявність дотичних напруг. Варті уваги праці [Bubniak, Bubniak, & Zyhar, 2020], автори яких зосереджують увагу на тектонічних порушеннях у районі експлуатації ГАЕС. Розглянемо деякі приклади наукових робіт із цієї теми. Науковці досліджували вплив коливань рівня води в басейні Трьох Ущелин на деформацію ґрунту [Wao, et al., 2015]. Під час дослідження здійснено випробування на деформацію ґрунту в умовах коливання рівня води та оцінено вплив цього фактора на властивості ґрунту [Jadid, et al., 2020]. У статті проаналізовано вплив коливань рівня води на стійкість схилів у околицях водосховища. Аналогічні дослідження відображено в працях [Herget, 1973; Tang, et al., 2019].

Мета

Основна мета дослідження полягає у виявленні залежності між змінами рівня води та деформацією ґрунту, де девіатором напружень є циклічна зміна навантажень на ложе резервуара водосховища, тобто резервуар ГАЕС виконує роль осцилятора поперечних коливань, а ґрунтовий екстензометр виконує функцію зчитування та фіксації цих коливань. Для вирішення завдання потрібно: записати часовий ряд коливань рівня води та часовий ряд коливань датчиків екстензометрів на всіх горизонтах заглиблення, виконати швидке перетворення Фур'є для коливань рівнів води окремо, далі аналогічно коливань кожного із датчиків екстензометра. Розрахувати спектр потужності сигналів окремо всіх датчиків в ґрунті. Зіставити амплітудно-частотні, фазово-частотні складові спектрів потужності коливань рівня води та вертикальних коливань екстензометричних датчиків. Детально із методами крос-спектрального аналізу можна ознайомитись у [Cooley, et al., 1965; Sorensen, et al., 1987; Molénat, et al., 2000; Zolfaghari, et al., 2012; Takemiya, 2008; Lin, et al., 2019].

Методика

Дністровська ГАЕС (гідроакумулююча електростанція) розташована за 8 км на північний-схід від міста Сокиряни, Чернівецької області (48°30'49"N, 27°28'24"E). Її будівництво розпочато у 1983 р. До сьогодні завершено перший етап будівництва – чотири гідроагрегати (із семи проектних). У результаті спорудження Дністровської ГАЕС утворилось Дністровське верхнє водосховище з площею дзеркала 3,0 км² та корисним об'ємом – 32,70 км³ [Укргідроенерго, 2023].

Дністровське верхнє водосховище розташоване на плато на 125 м вище від рівня Дністровського

руслового буферного водосховища і побудоване із вийманням та насипанням ґрунту в екран дна і дамб огороження, висота яких до 20 м. Для вивчення напружено-деформаційної поведінки ґрунтів у межах гірського плато (рис. 1), на якому розташована Дністровська ГАЕС, була пробурена екстензометрична свердловина (рис. 2). Свердловина охоплює два основні структурно-стратиграфічні комплекси, які беруть участь у геологічній структурі регіону – фундамент Східноєвропейської платформи (протерозой) та її осадовий покрив (фанерозойські утворення) Свердловина оснащена стаціонарними вертикальними екстензометричними п'ятиточковими сенсорами, які сполучені анкерами Geokon моделі 1150 (А-3) [Geokon, 2019], з кроком заглиблення 10 м. Глибина забою свердловини становить 50 м. Усі сенсори автоматизовані з використанням мікроелектромеханічної технології системи (MEMS). Сенсори здійснюють вимірювання автоматично щогодини. Для дослідження вибрано період з 1.01.2020 р. до 31.12.2021 р., упродовж якого отримано в середньому 8760 значень окремо на кожній із точок, а загалом разом із датчиками рівня води опрацьовано 52560 значень. Зазначимо, що принцип дії датчиків ґрунтується на визначенні відхилень контрольної маси через вимірювання диференціальної місткості. За допомогою цього методу можна визначити динамічне (удар або вібрацію) вертикальне коливання у ґрунтах. Стратиграфічне розташування геологічного горизонту для свердловини (рис. 2) визначено за зразками керна, вивчено в околицях свердловин та здійснено пресометричні дослідження деформативності гірських порід, лабораторно розраховано модуль Юнга (E) шарів (табл. 1). Загальнішу інформацію про геологічну будову досліджуваного об'єкта можна отримати у [State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine, 2021].

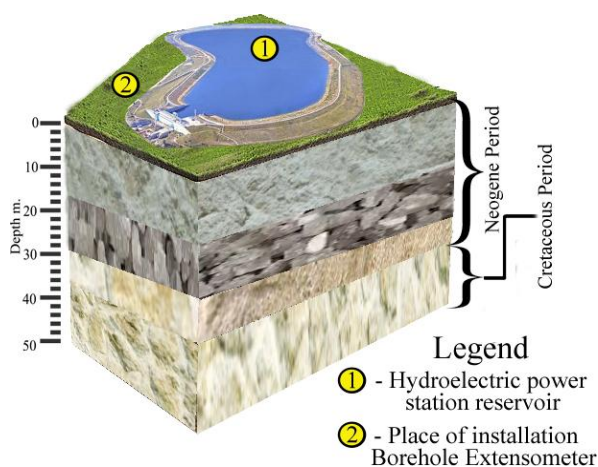


Рис. 1. Схема розташування водосховища та екстензометра на глибині 50 м.

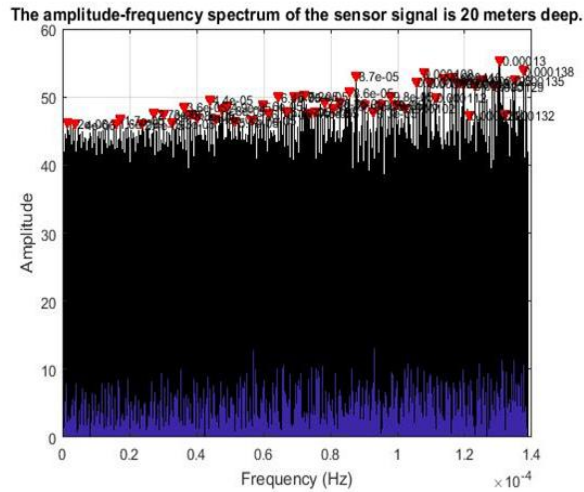


Рис. 5. Амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 20 м.

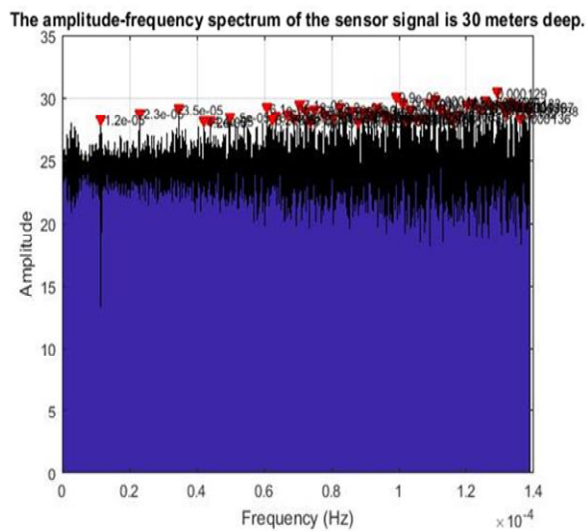


Рис. 6. Амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 30 м.

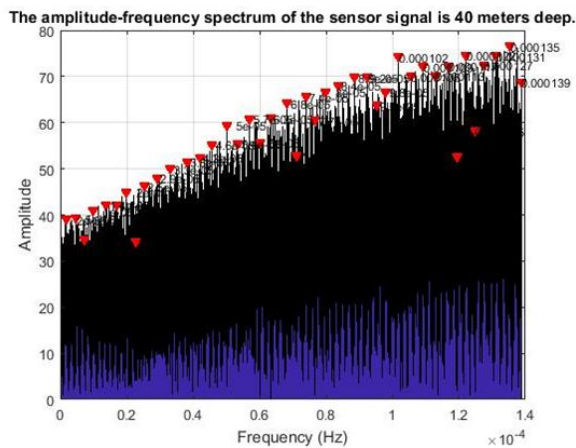


Рис. 7. Амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 40 м.

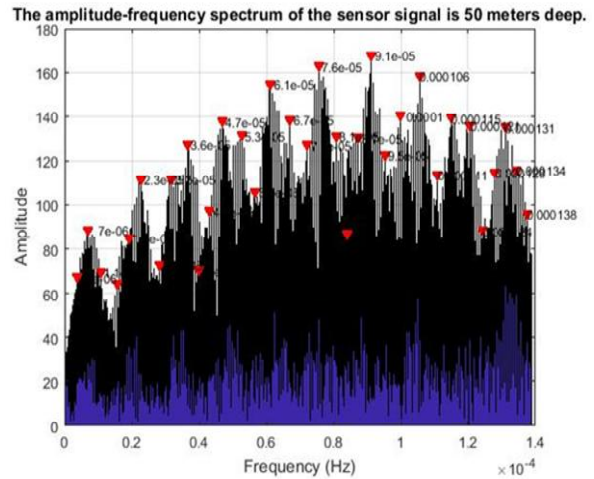


Рис. 8. Амплітудно-частотний спектр коливань ґрунту на глибині 50 м.

Отже, виконавши трансформації, можемо проаналізувати спектральний рисунок роботи гідроелектростанції за 2020 р. (рис. 3) та визначити ширину спектра частот $1,4 \times 10^{-4}$ Гц, що еквівалентно 140 мкГц. За гармонікою коливань чітко простежується значний енергетичний внесок частот: 3 мкГц, 12 мкГц, 23 мкГц, 35 мкГц та 46 мкГц. Основна енергетична щільність спектра зосереджена в діапазоні від 3 мкГц до 60 мкГц, такі малі значення не потрібно вважати “шумом”, оскільки середовище, в якому виконано вимірювання, майже повністю контрольоване.

На глибині 10 м у шарі ґрунту оолітового вапняку (рис. 4) спостерігається східчастий, синусоподібний спектр частот із тенденцією зростання за амплітудою. Такий спектр може бути характерний для сигналів із повторюваними імпульсами, які можна подати як суму гармонійних складових. У таких випадках спектр міститиме кілька вузьких піків на частотах, кратних основній частоті імпульсів, із наростанням значень амплітуди на вищих частотах. Також можливо, що спектр зростає із частотою через особливості геологічного шару, температури ґрунту, гідростатичний тиск ґрунтових вод, у якій генерується сигнал, наприклад, через резонансні ефекти, спричинені порівняно високою пружністю матеріалу. В нашому випадку це оолітовий вапняк з модулем пружності $E = 1500$ МПа та щільністю $2,7 \text{ t/m}^3$ [P. N. J., 1996; Johnson, et al., 1996; Priya, et al., 2001; Cao, 2018; Babacan, et al., 2018]. Підтверджує теорію причин східчастого збільшення амплітуди те, що в радіусі 20 м від екстензометричної свердловини рівень ґрунтових вод розміщений на глибині 17 м. Графік зміни рівня ґрунтових вод наведено на рис. 9. У такому разі, якщо амплітуда коливань зростає, це може вказувати на збільшення жорсткості оолітового вапняку. Якщо ж рівень ґрунтових вод знижується, то змінюється гідростатичний тиск на шар ґрунту. Зміна гідростатичного тиску на границі пластів

здатна вплинути на жорсткість ґрунту, зокрема на його можливість сприймати навантаження.

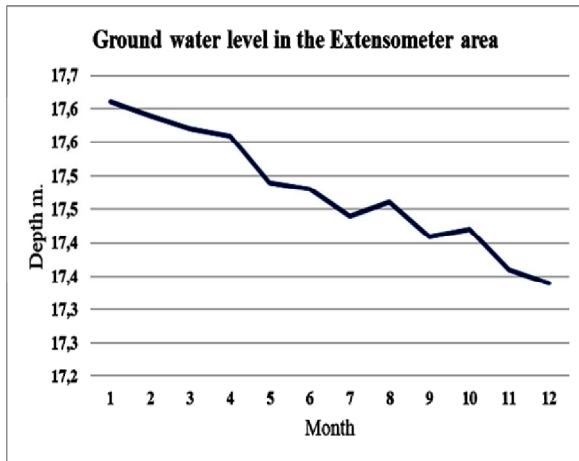


Рис. 9. Графік зміни рівня ґрунтових вод у радіусі 20 м від екстензометричної свердловини.

На глибинах 20 та 30 м залягають геологічні шари із порівняно низькими модулями пружності: кварцовий пісок з модулем пружності $E = 50$ МПа, та кремній у піщаному заповненні з $E = 120$ МПа відповідно. Не треба вважати, що ці породи ґрунтів слабкі та нестійкі до механічних коливань, навпаки, вони достатньо міцні та спресовані, містять включення алевролітів, важких глин тощо. Значення показника ($\text{tg } \varphi$) (див. табл. 1) можна інтерпретувати як показник кількості дефектів ґрунту. У природному стані ці дефекти утримуються між собою за допомогою так званих структурних зв'язків, у разі розриву яких ґрунт переходить у розущільнений стан і прагне утворити кут природного укосу на основі теорії Кулона [Karl, 1962; Vainberg, 1993; Zuhar, et al., 2021; Geidt, et al., 2021]. Спектр сигналу в піщаному ґрунті дуже

зашумлений, це може означати, що в сигналі міститься багато випадкових шумових компонент, які маскують основні сигнальні складові. Цей шум може виникати внаслідок різних чинників, таких як обводненість горизонту та температурний шум. У піщаному ґрунті можливі коливання, спричинені багатьма факторами: сили тяжіння, сили тертя і взаємодії частинок ґрунту між собою.

Для поліпшення якості амплітудно-частотного спектра знадобиться використання алгоритмів обробки сигналів, які дадуть змогу видобувати сигнали із зашумлених даних, наприклад, за допомогою фільтрації або посилення основних сигнальних компонент. Аналогічна ситуація спостерігається у спектрі коливань на глибині 40 м (рис. 7) – геологічний шар мергелів у кременістому заповненні.

На глибині 50 м – прошарки пісковиків $E = 400$ МПа (рис. 8), аналогічно з оолітовим вапняком спостерігається східчастий, синусоподібний спектр частот, основна відмінність – зі збільшенням частоти амплітуда загасає.

Одне із можливих пояснень цього ефекту полягає у сезонних температурних коливаннях, на тлі динамічного навантаження унаслідок експлуатації гідроенергетичного об'єкта. Для визначення взаємозв'язку між сигналами, тобто кореляції між ними, використано метод cross-spectral density. Крос-спектральну щільність можна обчислити за допомогою різних методів, разом із методом кореляційної функції, методом фур'є-аналізу, методом гармонійного аналізу та іншими. В цьому випадку використано метод гармонійного аналізу, описаний [Thomson, 1982].

Результати обчислення крос-спектральної щільності подано у вигляді графіка, який відображає залежність взаємозв'язку між двома сигналами залежно від частоти на глибині 10 м (рис. 10), аналогічно на глибинах 20 м (рис. 11), 30 м (рис. 12), 40 м (рис. 13) та 50 м (рис. 14).

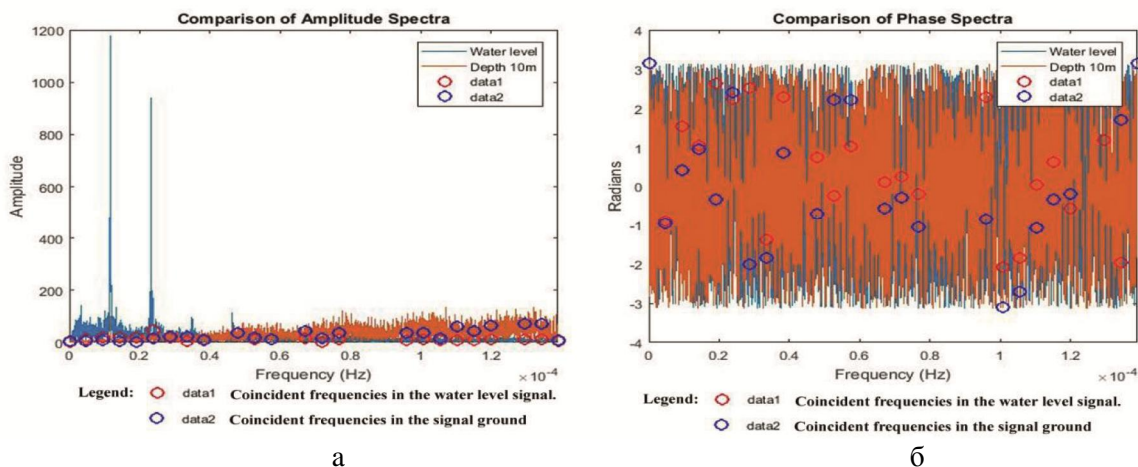


Рис. 10. Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика “Рівень води” та ексцентрикового датчика на глибині 10 м (а), порівняння фазових спектрів (б).

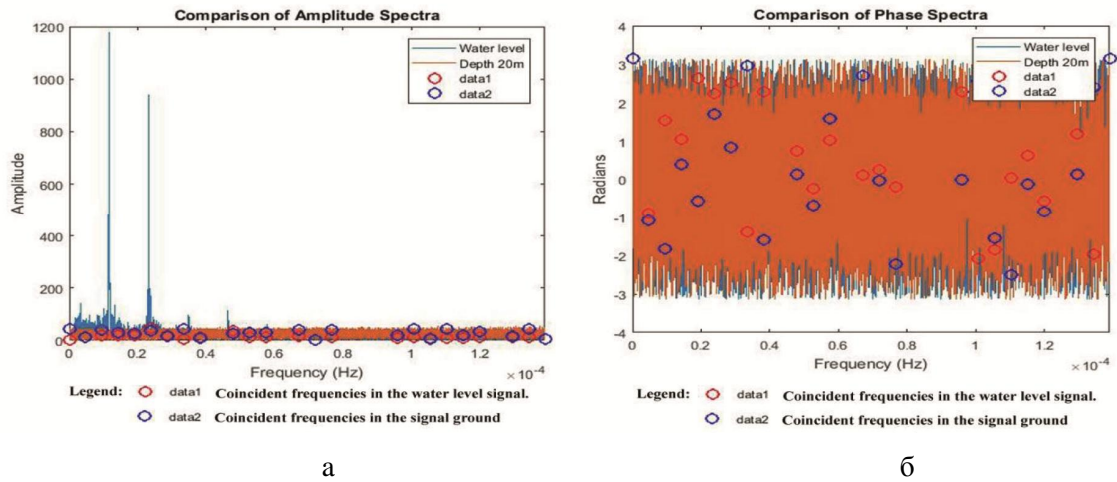


Рис. 11. Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика “Рівень води” та ексцентрикового датчика на глибині 20 м (а), порівняння фазових спектрів (б).

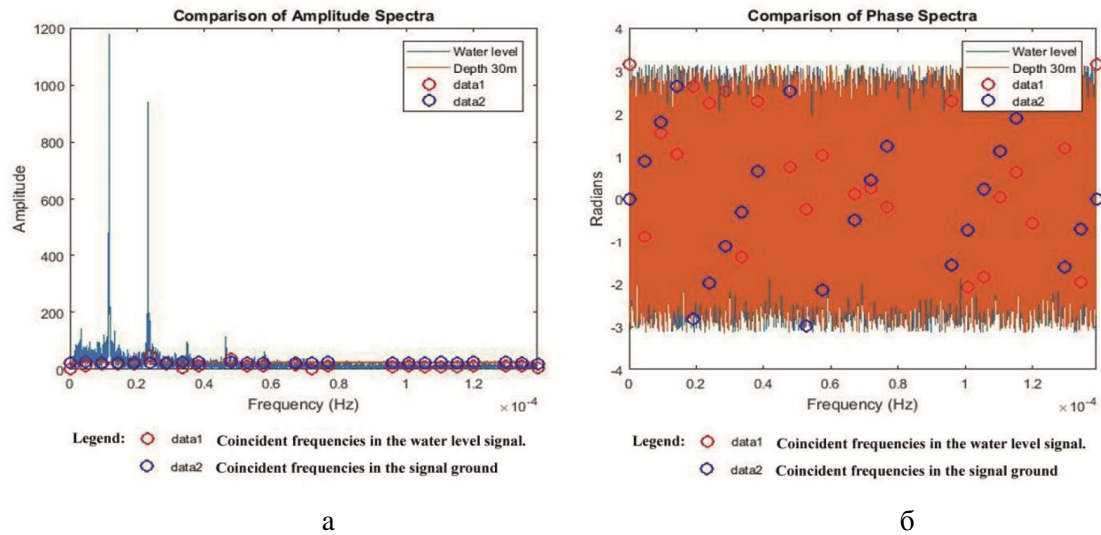


Рис. 12. Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика “Рівень води” та ексцентрикового датчика на глибині 30 м (а), порівняння фазових спектрів (б).

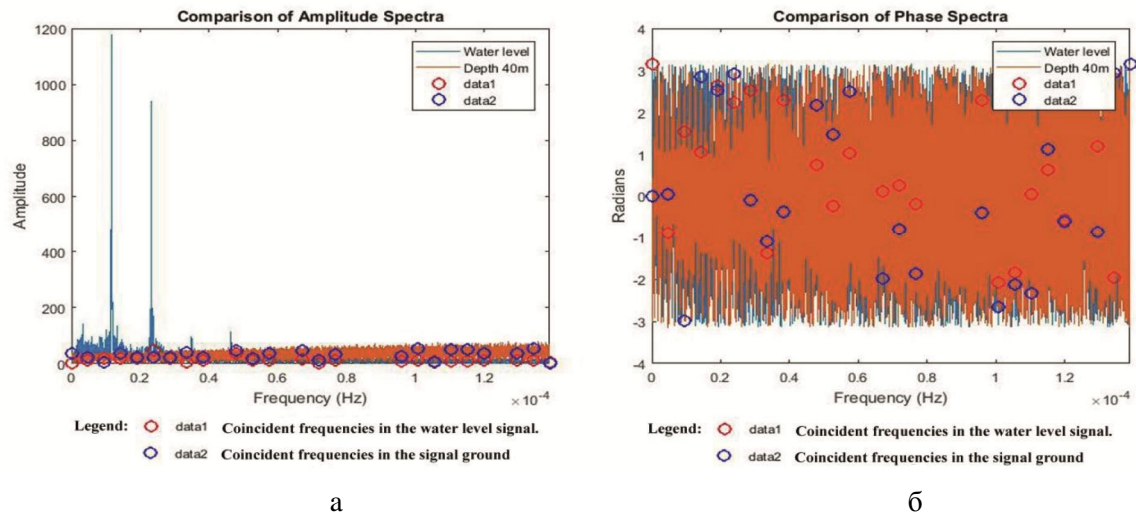


Рис. 13. Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика “Рівень води” та ексцентрикового датчика на глибині 40 м (а), порівняння фазових спектрів (б).

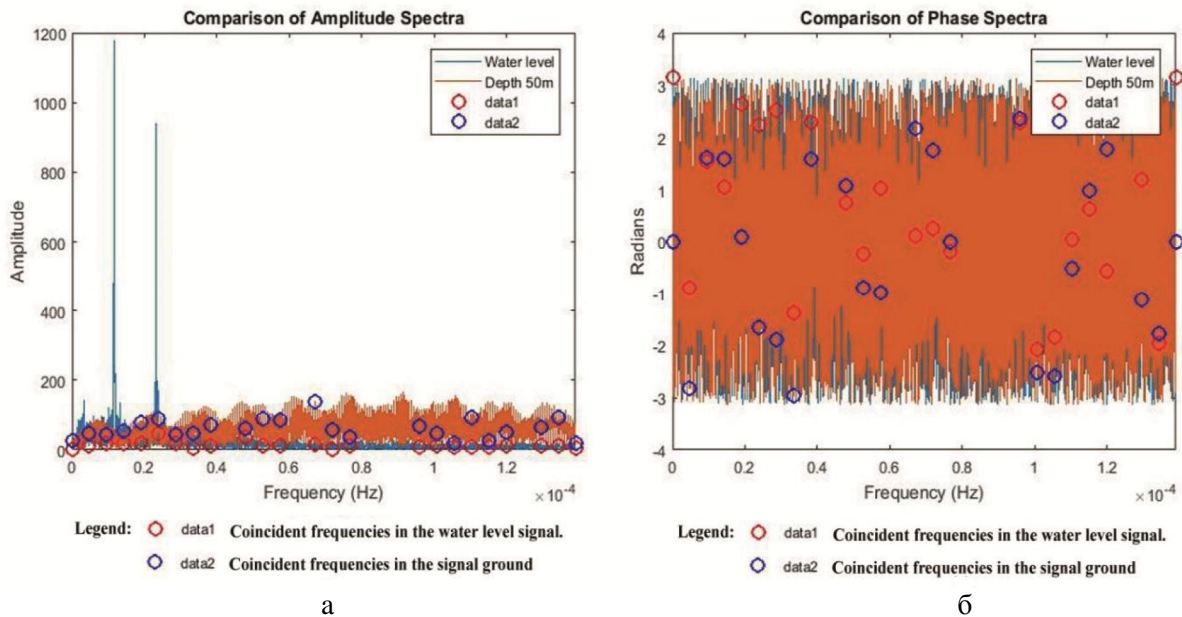


Рис. 14. Порівняльна крос-спектральна щільність сигналів датчика “Рівень води” та ексцентрикового датчика на глибині 50 м (а), порівняння фазових спектрів (б).

Наукова новизна

Дослідження, висвітлені в статті, дають змогу точніше оцінити частотний спектр коливань і визначити резонансні явища, що можуть виникати в ґрунтах під час роботи енергооб’єкта. Крім того, дослідження здійснено в конкретному регіоні, що дає змогу оцінити ризики, отримати точніші дані про вплив низькочастотних коливань на геосистему в цьому регіоні. Отже, це дослідження може становити інтерес для фахівців у галузі геотехніки, геології та енергетики, а також може бути використане під час планування та експлуатації інших енергооб’єктів у подібних умовах.

Практична значущість

Низькочастотні хвилі можна виявити за допомогою сейсмічних приладів, таких як сейсмометри. Результати цього дослідження допоможуть коригувати аналіз та інтерпретацію сейсмограм, що важливо для розуміння процесів, які відбуваються у зоні експлуатації гідроелектростанції.

Висновки

Результати дослідження підтвердили, що між змінами рівня води та деформацією ґрунту існує певна залежність. У цьому випадку роль генератора напружень виконує циклічна зміна навантажень на ложе резервуара водосховища, тобто резервуар ГАЕС відіграє роль осцилятора поперечних хвиль. Це продемонстровано на графіках, де порівняно спектри фаз. Крім того, дослідження виявило, що на спектрах вертикальних коливань рівня води та ґрунту є значні перекриття, що свідчить про наяв-

ність резонансних явищ у системі “конструктив – основа”. Визначено основні характеристики спектра коливань ґрунту, такі як форма та амплітуда, що може допомогти в подальших дослідженнях динамічних властивостей ґрунту.

Після виконаних трансформацій можна проаналізувати спектральний рисунок роботи гідроелектростанції за 2020 р. та визначити ширину спектра частот $1,4 \times 10^{-4}$ Гц, що еквівалентно 140 мкГц. З гармоніки коливань чітко простежується значний енергетичний внесок частот: 3 мкГц, 12 мкГц, 23 мкГц, 35 мкГц та 46 мкГц. Довжина низькочастотних хвиль дуже велика, вимірюється тисячами кілометрів. Вони можуть поширюватися на великі відстані, шлях поширення хвилі та її розсіювання залежатимуть від властивостей ґрунту, в якому вона поширюється. Коли хвиля проникає у пружніший ґрунт, вона може продовжувати рух. Однак під час переходу хвилі з одного типу ґрунту в інший можливе її відбиття, заломлення і розсіювання, що впливає на її форму та амплітуду. Низькочастотні хвилі можна виявити за допомогою сейсмічних приладів, таких як сейсмометри. Результати цього дослідження допоможуть коригувати аналіз та інтерпретацію сейсмограм, що важливо для розуміння процесів, які відбуваються у зоні експлуатації гідроелектростанції. Під час дослідження встановлено, що проаналізовані низькочастотні коливання не впливають негативно на здоров’я людей і є безпечними, не потребують додаткових заходів безпеки або застережень. Насамперед низькочастотні коливання, як показали дослідження, можуть підвищувати коефіцієнт сейсмічності в ре-

гіонах, де розташовані енергооб'єкти. Наприклад, якщо розглянути кубічний зразок оолітового вапняку розміром 10×10 м і дослідити його власні коливання, то резонансна частота буде починатись в середньому із 300 Гц. Однак, якщо виконати розрахунок для кубічного зразка із довжиною граней 100 м, то резонансна мода починатиметься із 6 Гц. Отже, низькочастотні коливання можуть впливати на великі геологічні блоки та спричиняти накопичення напружень у розломах між ними.

Список літератури

- Babacan, A. E., & Akın, Ö. (2018). The investigation of soil-structure resonance of historical buildings using seismic refraction and ambient vibrations HVSR measurements: a case study from Trabzon in Turkey. *Acta Geophysica*, 66, 1413–1433. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0208-0>
- Bao, Y., Gao, P., & He, X. (2015). The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir—A unique geomorphological unit. *Earth-Science Reviews*, 150, 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.005>
- Bosy, J., Kaplon, J., Rohm, W., Sierny, J., & Hadas, T. (2012, September 27). Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data. *Annales Geophysicae*, 30(9), 1379–1391. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1379-2012>
- Bubniak, A. M., Bubniak, I. M., & Zyhar, A. I. (2020). Lineaments analysis of the Dniester area (between Bakota and Novodnistrovsk). *Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020*, 2020(1), 1–4. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo110>
- Cao, X. (2018). Analysis on the phase frequency characteristic of soil impedance. *Energy and Power Engineering*, 10(04), 17. https://www.scirp.org/html/83604_83604.htm
- Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297–301. <https://doi.org/10.1090/s0025-5718-1965-0178586-1>
- Geidt, V. D., Geidt, L. V., Geidt, A. V., & Sheshukova, S. V. (2021, December). Effect of Deep Vibration on Physical State of Soil Being Changed. *Civil Engineering and Architecture*, 9(7), 2273–2277. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090714>
- Geokon. (2019). *Instruction Manual 1150 (A-3) Borehole Extensometer*. Отримано з https://www.geokon.com/content/manuals/1150_Borehole_Ext Model_A3.pdf
- Herget, G. (1973, January). Variation of rock stresses with depth at a Canadian iron mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 10(1), 37–51. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(73\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(73)90058-2)
- Jadid, R., Montoya, B. M., Bennett, V., & Gabr, M. A. (2020). Effect of repeated rise and fall of water level on seepage-induced deformation and related stability analysis of Princeville levee. *Engineering Geology*, 266, 105458. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105458>
- Johnson, P. A., Zinszner, B., & Rasolofosaon, P. N. J. (1996, May 10). Resonance and elastic nonlinear phenomena in rock. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B5), 11553–11564. <https://doi.org/10.1029/96jb00647>
- Lin, H. C., & Ye, Y. C. (2019, January). Reviews of bearing vibration measurement using fast Fourier transform and enhanced fast Fourier transform algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1), 168781401881675. <https://doi.org/10.1177/1687814018816751>
- Molénat, J., Davy, P., Gascuel-Oudou, C., & Durand, P. (2000, January). Spectral and cross-spectral analysis of three hydrological systems. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(4), 391–397. [https://doi.org/10.1016/s1464-1909\(00\)00032-0](https://doi.org/10.1016/s1464-1909(00)00032-0)
- Priya, S., Viehland, D., Carazo, A. V., Ryu, J., & Uchino, K. (2001, August). High-power resonant measurements of piezoelectric materials: Importance of elastic nonlinearities. *Journal of Applied Physics*, 90(3), 1469–1479. <https://doi.org/10.1063/1.1381046>
- Savchyn, I. (2018, January 18). Local geodynamics of the territory of dnier pumped storage power PLANT. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 41–46. <https://doi.org/10.13168/agg.2018.0002>
- Sidorov, I. S., Periy, S., & Sarnavskiy, V. H. (2015, December 11). Determination of the earth surface movements in areas of Dniester HPPS using satellite and ground geodetic methods. *Geodynamics*, 2(19)2015(2(19)), 15–25. <https://doi.org/10.23939/jgd2015.02.015>
- Sorensen, H. V., Jones, D., Heideman, M., & Burrus, C. (1987). Real-valued fast Fourier transform algorithms. *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 35(6), 849–863. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165220>
- State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine (2021). *State geological map of Ukraine on scale of 1:200,000 sheets M-35-XXVIII (Bar), M-35-XXXIV (Mohyliv-Podilskyi)*. Retrieved 2021, from <https://www.geo.gov.ua/>
- Takemiya, H. (2008, February). Analyses of wave field from high-speed train on viaduct at

- shallow/deep soft grounds. *Journal of Sound and Vibration*, 310(3), 631–649. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.09.056>
- Tang, H., Wasowski, J., & Juang, C. H. (2019). Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China—Lessons learned from decades of research. *Engineering Geology*, 261, 105267.
- Thomson, D. (1982). Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proceedings of the IEEE*, 70(9), 1055–1096. <https://doi.org/10.1109/proc.1982.12433>
- Ukrhydroenergo. (2023). https://uhe.gov.ua/filiyi/dyrektsiya_z_budivnytstva_dnistrovskoyi_haes
- Vainberg, A. I. (1993). Forces in the casing of the aggregate shafts of the Dnestrovsk water-storage electric power plant. *Journal of Mining Science*, 29(1), 27–31. <https://doi.org/10.1007/bf00734327>
- Zolfaghari, R., Shrivastava, Y., & Agelidis, V. G. (2012, March). A comparison between different windows in spectral and cross-spectral analysis techniques with Kalman filtering for estimating power quality indices. *Electric Power Systems Research*, 84(1), 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.10.017>
- Zyhar, A., Savchyn, I., Yushchenko, Y., & Pasichnyk, M. (2021, June 29). *Geodynamics*, 1(30)2021(1(30)), 17–24. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.017>

Andrii ZYHAR

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsyubynskoho Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine, e-mail: zuggarandrei@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3882-8829>

APPLICATION OF CROSS-SPECTRAL ANALYSIS AND FAST FOURIER TRANSFORM TO DETECT SOIL VIBRATIONS IN THE NATURAL AND TECHNICAL GEOSYSTEM OF THE DNIESTER PSPP

The main purpose of the study is to identify the relationship between changes in water level and soil deformation, where the cyclic change in loads on the reservoir bed is the stress diviator, i.e., the PSPP reservoir acts as an oscillator of transverse vibrations, and the soil extensometer performs the function of reading and recording these vibrations. Methodology. To solve the problem, record the time series of water level fluctuations and the time series of extensometer sensor fluctuations at all depths, perform a fast Fourier transform for water level fluctuations separately, then similarly for each extensometer sensor fluctuation. Calculate the signal power spectrum of all sensors in the soil separately. Compare the amplitude-frequency, phase-frequency components of the power spectra of water level oscillations and vertical oscillations of the extensometer sensors. Results. During the studies, it was found that the PSPP reservoir is a source of low-frequency vibrations in a wide spectral range. These vibrations have a very long wavelength, measured in tens of thousands of kilometers, which can propagate over long distances, both along the front of geological layers and in depth. Scientific innovation. The research in this article allows us to more accurately assess the frequency spectrum of vibrations and identify possible resonance phenomena that may occur in soils during the operation of a power facility. In addition, this study was conducted in a specific region, which makes it possible to obtain more accurate data on the impact of low-frequency vibrations on the geosystem in this region. Thus, this study may be of interest to specialists in the field of geotechnics, geology and energy, and can also be used in the planning and operation of other power facilities in similar conditions. Practical significance. Low-frequency waves can be detected by seismic instruments such as seismometers. The results of this study will help to correct the analysis and interpretation of seismograms, which is important for understanding the processes occurring in the hydroelectric power plant operation area.

Key words: oolitic limestone; geotechnical monitoring; extensometer; pumped storage power plant; soil base; soil condition; spectral density; Fast Fourier Transform.

Надійшла 08.04.2023 р.