

УДК 699.841

Бахтин А.І., аспірант
Крючков А.І., к.т.н., доц.
Кафедра геоінженерії
КПІ імені Ігоря Сікорського

ОЦІНКА ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТУ НА СПЕКТРАЛЬНУ СКЛАДОВУ СЕЙСМІЧНИХ КОЛИВАНЬ

У ході аналітичних та експериментальних досліджень встановлені автоковаріаційні функції та енергетичні автоспектри вхідного та вихідного імпульсів хвиль деформації для системи «грунт – фундамент». Проаналізовано зміну амплітуди та енергії сейсмічних коливань при проходженні вибухового імпульсу через фундамент дослідного об'єкту. Виявлено діапазон резонансних частот сейсмічних коливань ґрунтового масиву та фундаменту дослідної конструкції. Досліджено стійкості системи та умови розвитку мікротріщин за допомогою фазово-амплітудної характеристики взаємного енергетичного спектра.

Ключові слова: автоковаріаційна функція, енергетичний автоспектр, частота, амплітуда, фундамент, ґрунт, швидкість коливань.

In the course of analytical and experimental researches the autocovariance functions and energy autospectra of the input and output pulses of deformation waves for the system "soil - foundation" are established. The change of amplitude and energy of seismic oscillations during the passage of the explosive pulse through the foundation of the experimental object is analyzed. The range of resonant frequencies of seismic oscillations of the soil mass and the foundation of the experimental object is established. The stability of the system was analyzed using the phase-amplitude characteristic of the mutual energy spectrum.

Key words: autocovariance function, energy autospectrum, frequency, amplitude, foundation, soil, oscillation speed.

Вступ. Важливим питанням для оцінки сейсмічної безпеки об'єктів, що охороняються є вивчення особливостей проходження пружних хвиль. Проведення підливних робіт несе підвищену небезпеку, здатну створювати загрозу багатофакторного ураження як на місці вибуху, так і на великих відстанях від нього. Особливо актуальним є питання збереження будівель неподалік кар'єру та його бортів.

Основна частина енергії сейсмічних хвиль, що розповсюджується від місця вибуху до об'єктів, що охороняються, зосереджена в порівняно вузькому діапазоні частотного спектра коливань, параметри яких залежать від геологічної будови, термодинамічних параметрів ділянки гірського масиву, що розглядається, а також технологічних параметрів вибуху.

Вибух заряду моделює певний невеликий землетрус, епіцентр якого знаходиться в місці закладання заряду. Під дією вибухового імпульсу в породі виникає хвиля деформації, яка в свою чергу призводить до коливань масиву та об'єктів, що охороняються.

Мета та завдання. Метою даної роботи є дослідження дисипації та розподілу енергії вибухових імпульсів при проходженні їх через гірський масив та фундамент об'єктів, що охороняються. Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити ряд наукових задач: 1) дослідження автоковаріаційних функцій та автоспектрів вхідного та вихідного імпульсів хвиль деформації; 2) оцінка амплітуди та енергії сейсмічних коливань при проходженні вибухового імпульсу через фундамент дослідної конструкції; 3) встановлення резонансних частот сейсмічних коливань ґрунтового масиву та фундаменту дослідної конструкції; 4) аналіз стійкості системи та умов розвитку мікротріщин за допомогою фазово-амплітудної

характеристики взаємного енергетичного спектра.

Матеріал і результати досліджень. Цементні заводи як правило розміщуються неподалік кар'єрів для видобутку сировини. Як наслідок проведення масових вибухів впливає на сейсмостійкість цих технологічних об'єктів. Як приклад в даній роботі розглядається один із майже типових випадків: на відстані 600 та 1800 м від цементного заводу знаходяться два діючих кар'єра на яких здійснюються періодичні масові вибухи. Висота кожної із чотирьох силосних веж становить 42,6 м, діаметр – 12 м, корисний об'єм – 4400 т цементу. Вежі об'єднані в один блок та розміщені на цементобетонній фундаментній плиті $27 \times 27 \times 2$ м. Під впливом періодичних масових вибухів ґрунт під фундаментом силосних веж почав деформуватися, що призвело до нахилання фундаменту, зміщення центру маси споруди та утворення моменту сил, що в свою чергу збільшило навантаження на фундамент. Цей факт змушує переглянути допустимі динамічні навантаження та визначити умови безпечних сейсмічних коливань.

Для оцінки впливу характеристик фундаменту дослідного об'єкту на спектральний склад сейсмічних коливань конструкції використані експериментальні заміри зміщень (u) по осі X на поверхні ґрунту (70 м від фундаменту) та вершині фундаменту [1].

Для енергетичного спектрального аналізу та подальшої інтерпретації результатів зручніше використовувати швидкість зміщення ($\dot{u}$). Швидкість зміщення ($\dot{u}$) отримаємо про диференціювавши зміщення u по часу t (рис. 1).

Припустимо, що цифрові дані $\dot{u}_t$, $t = 0, \dots, N$ (N – кількість дискретних точок вибірки) відповідає значенням сигналу $\dot{u}(t)$ відрахованого через однакові інтервали. Позначимо швидкість зміщення вхідного імпульсу (коливання ґрунту на відстані 70 м від фундаменту) через X , а вихідного (вершина фундаменту) через Y . Вибіркова оцінка коваріаційної функції в цьому випадку буде мати вигляд рівнянь (рис. 2) [2]:

$$c_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})]; \quad (1)$$

$$c_{yy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(Y_t - \bar{Y})(Y_{t+k} - \bar{Y})]. \quad (2)$$

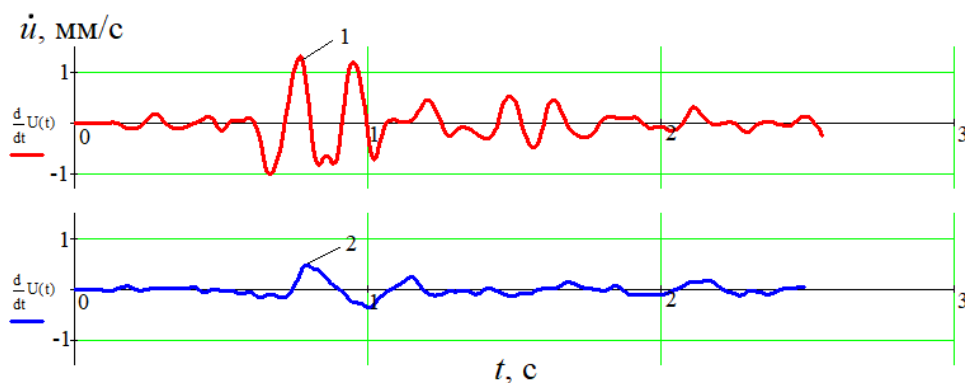


Рис. 1 – Осцилограми вибухів:

1 – швидкість зміщення при вхідному імпульсі; 2 – швидкість зміщення при вихідному імпульсі

де $c_{xx}(k)$, $c_{yy}(k)$ – вибіркові оцінки автоковаріаційних функцій вхідного та вихідного імпульсів відповідно.

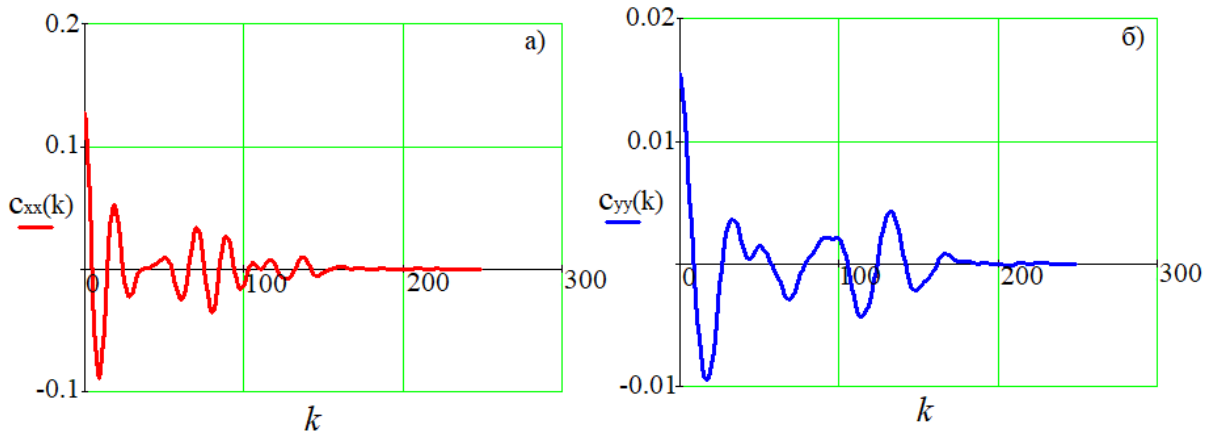


Рис. 2 – Вибіркові оцінки автоковаріаційних функцій вхідного (а) та вихідного імпульсів (б)

Коефіцієнт коваріації показує своєю величиною силу взаємозв'язку між дискретними змінними. Автоковаріаційні функції мають згасаючий характер.

У вхідного та вихідного імпульсів, окрім взаємозв'язків між власними дискретними змінами існує і вплив один на одного. Для оцінки цієї сили взаємодії необхідно розрахувати коефіцієнт спільної коваріації (рис. 3):

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(X_t - \bar{X})(Y_{t+k} - \bar{Y})], \quad (3)$$

$$c_{yx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} [(Y_t - \bar{Y})(X_{t+k} - \bar{X})]. \quad (4)$$

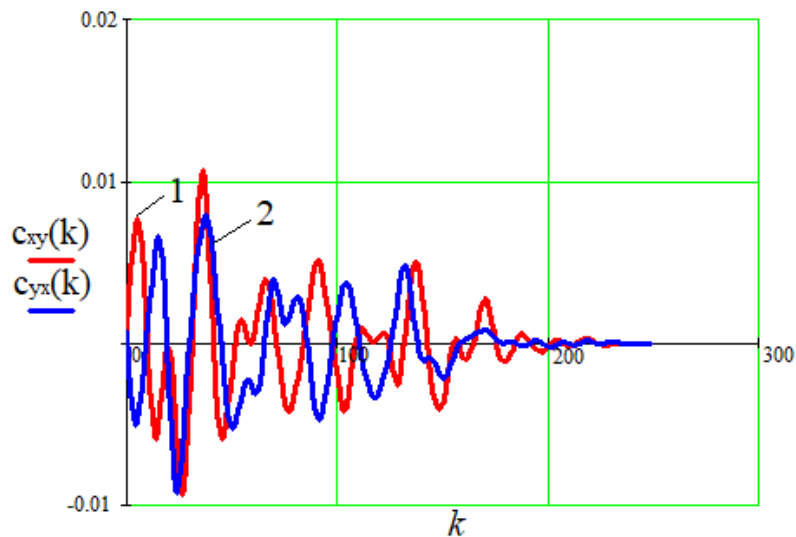


Рис. 3 – Вибіркові оцінки спільних коваріаційних функцій:

1 – вплив вхідного імпульсу на вихідний; 2 - вплив вихідного імпульсу на вхідний.

Вибіркова оцінка енергетичних автоспектрів вхідного $G_{xx}(f)$ та вихідного $G_{yy}(f)$ імпульсів розраховується за рівняннями 5, 6 [2] та представлена на рис. 4.

$$G_{xx}(f) = 2 \left[c_{xx}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot c_{xx}(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi f k}{F}\right) \right) \right]; \quad (5)$$

$$G_{yy}(f) = 2 \left[c_{yy}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(\omega_p(k) \cdot c_{yy}(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi f k}{F}\right) \right) \right]. \quad (6)$$

де f – частота сейсмічних коливань, Гц; $\omega_p(k)$ – коваріаційне вікно; L – ширина смуги частот коваріаційного вікна; $F = 2L$.

Для максимального збереження інформації при низькочастотних коливаннях в даній роботі використовується коваріаційне вікно Парзена [2]:

$$\omega_p(k) = \begin{cases} 1 - \frac{6k^2}{L^2} \left(1 - \frac{k}{L}\right), & 0 \leq k \leq \frac{L}{2} \\ 2 \left(1 - \frac{k}{L}\right)^3, & \frac{L}{2} \leq k \leq L. \end{cases} \quad (7)$$

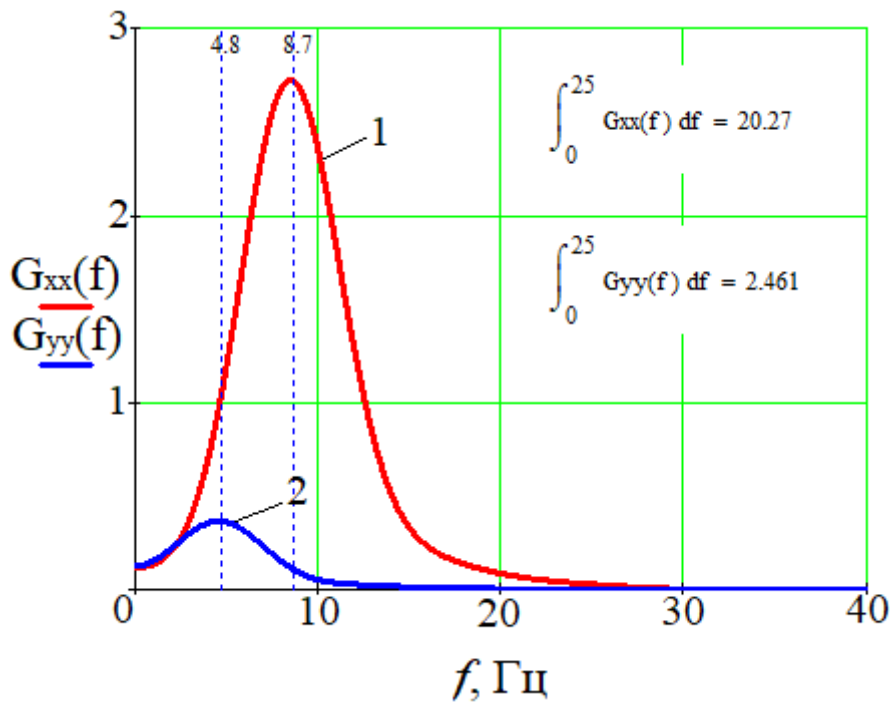


Рис. 4 – Вибіркові оцінки енергетичних автоспектрів вхідного (1) та вихідного імпульсів (2)

Враховуючи те, що розповсюдження сейсмічних хвиль є багатовимірним та багатоімпульсним процесом, при подальших дослідженнях необхідно досліджувати взаємні спектральні характеристики (кросс-спектр). Кросс-спектральний аналіз є багатомірним узагальненням двовимірного випадку і зводиться до розрахунку двох спектральних функцій (Гренджер, Хатанака) [2]: ко-спектра та квадратурного спектра:

$$L_{xy}(f) = 2 \left[l_{xy}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} \left(l_{xy}(k) \cdot \omega_p(k) \cdot \cos\left(\frac{\pi f k}{F}\right) \right) \right]; \quad (8)$$

$$Q_{xy}(f) = 4 \sum_{k=1}^{L-1} \left(q_{xy}(k) \cdot \omega_p(k) \cdot \sin\left(\frac{\pi f k}{F}\right) \right); \quad (9)$$

де: $Q_{xy}(0) = Q_{xy}(F) = 0$.

Для розрахунку ко-спектра та квадратурного спектра (рис. 5) необхідно із взаємної автоковаріаційної функції (рівняння 3-4) виділити парну та непарну складові [2]:

$$l_{xy}(k) = \frac{1}{2} [c_{xy}(k) + c_{yx}(k)]; \quad (10)$$

$$q_{xy}(k) = \frac{1}{2} [c_{xy}(k) - c_{yx}(k)], \quad (11)$$

де: $q_{xy}(0) = 0$.

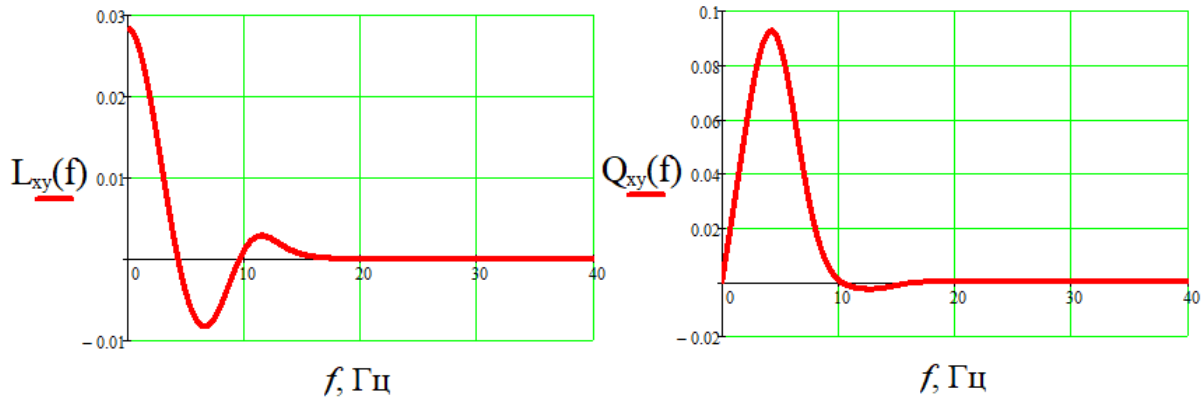


Рис. 5 – Ко-спектр (дійсна складова взаємного спектра) (а) та квадратурний спектр (уявна складова взаємного спектра) (б)

Ко-спетр та квадратурний спектр дозволяє дослідити взаємну фазово-амплітудну характеристику (годографа) (рис. 6).

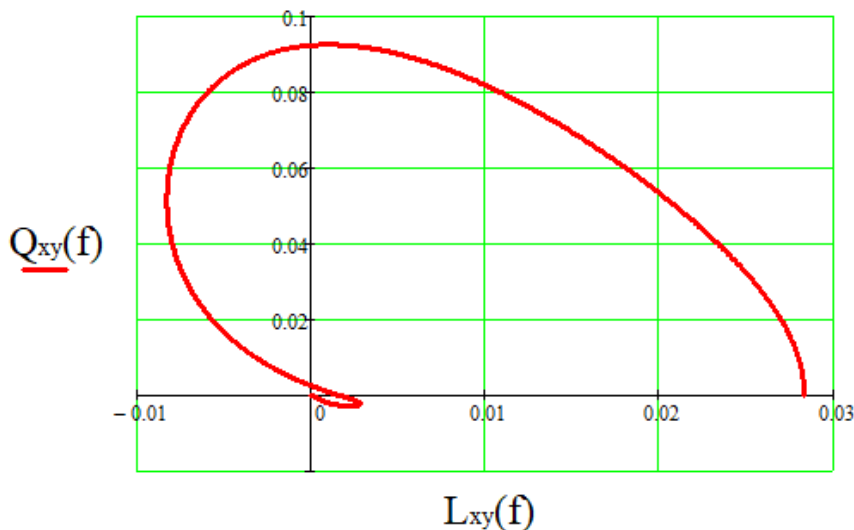


Рис. 8 – Фазово-амплітудна характеристика взаємного спектра

Висновки:

1) Амплітуда сейсмічних коливань вихідного імпульсу (поверхня фундаменту) в 7,35 разів нижча за амплітуду коливань ґрунту на відстані 70 м від дослідного об'єкта, а енергія нижча в 8,23 рази. Це свідчить про те, що фундамент дослідного об'єкта поглинув близько 88 % сейсмічної енергії.

2) Діапазон частот 5-9 Гц є резонансним. В цьому діапазоні, частота коливань фундаменту дослідного об'єкта близька до частоти коливань вхідного імпульсу, що призводить до збільшення енергії та амплітуди сейсмічних коливань та утворення у фундаменті мікротріщин.

3) Характер та форма фазово-амплітудної характеристики взаємного спектра (годографа) вказує на те, що дослідна система «джерело вибуху-ґрунтовий масив-фундамент»

нестійка і частина енергії витрачається на утворення мікротріщин.

4) Використана в роботі методика досліджень характеристик гірського масиву та об'єктів, що охороняються, свідчить про можливість більш детального вивчення механізму розвитку мікротріщин та їх переходу до нестійкого руйнування.

Список використаної літератури

1. Кабаков В. А., Овсянников П. И., Помогов И. Г. Сейсмическое действие взрывов на силосные башни Новокарагандинского цементного завода. *Горное дело: Сейсмика промышленных взрывов*. Москва, 1983. Вып. 85/42. С. 174-178.
2. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. Москва: Мир, 1972. Т. 2. 285 с.