

О.О. ШУМЕЙКО, д.т.н, професор
 Д.С. ПІКАРЕНЯ, д.геол.н, професор
 Д.Б. ДМИТРІЄНКО, магістр
 Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське

Використання спектральної інверсії для виявлення процесу руйнування гірських порід

В роботі запропоновано метод фіксації часу розриву суцільності ґрунту, у результаті порушення природної рівноваги залягання прошарків порід на основі реєстрації електромагнітного випромінювання, яке виникає як під час природних процесів, так і внаслідок діяльності людини. Для виявлення відповідного сигналу запропоновано використовувати систему фільтрів на основі методу спектральної інверсії, а для фільтрації періодичного технологічного шуму — використати дискретне косинус-перетворення.

Вступ

Процеси руйнування суцільності гірських порід під впливом природних факторів або діяльності людини привертають великої уваги у зв'язку з прогнозуванням їх можливих наслідків. Однією з форм проявлення руйнування порід є утворення зсувів ґрунту. Зсуви виникають у результаті порушення природної рівноваги залягання прошарків гірських порід з розривом їх суцільності і переміщенням у горизонтальному або близькому до нього напрямі. Вони виникають на схилах долин або річкових берегів, у горах, на берегах морів тощо, а також у результаті діяльності людини (техногенні зсуви при гірничих та будівельних та інших роботах).

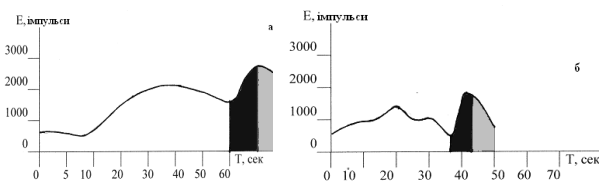
Характерною особливістю зсувів є раптовість їх утворення та доволі висока швидкість їх розвитку. Вони призводять до формування зсувного рельєфу та руйнуванню будь-яких побудов на поверхні та під землею, інколи до загибелі людей. Тому прогнозування зсувів та запобігання їх розвитку є актуальною задачею інженерного захисту територій. Розвиток зсувів зазвичай складається з трьох стадій: перша — початкова — виникнення та розвиток напружень у масиві ґрунтів, які спрямовані на відривання майбутнього зсуву від материнської породи; друга — власне зсувна — формування тріщини відриву тіла зсуву та його рух по поверхні ковзання; третя — заключна — поступове зменшення швидкості руху зсувних мас ґрунту, формування фронтального валу (бугра) пучення (випирання) та остаточне припинення руху зсуву.

Постановка задачі

Запобігти розвитку зсувного процесу можна лише на першій стадії або на вранішніх етапах розвитку другої, тому саме прогнозування та вивчення напружень у породному масиві дає змогу відвернути зсув. Одним з методів, який дозволяє таке вивчення, є геофізичний метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ), котрий вже доволі успішно застосовується при вирішенні інженерно-геологічних та інших задач [1]. Він заснований на реєстрації електромагнітного випромінювання, яке виникає як під час природних процесів, так і внаслідок діяльності людини. Не вдаючись в теорію виникнення природного електромагнітного поля, відмітимо, що головними факторами його формування та змінення є п'єзоелектричний ефект у мінералах та гірських породах та різноспрямовані деформації та напруження тектонічних порід, в тому числі ті, що призводять до їх руйнування (утворення тріщин та розривів).

Наприклад, експерименти, що проведені Г.М. Стовас та ін. [2] показали, що під час стискування зраз-

ків піщаника спостерігається зростання електромагнітних імпульсів, а в момент руйнування зразків їх кількість різко зменшується (рис. 1). Ці та інші дослідження дозволяють говорити про те, що перед тим, як почнеться друга стадія утворення зсуву, буде відчутно зростати кількість електромагнітних імпульсів, а лавиноподібний характер їх зросту може свідчити про скорий відрив мас ґрунту. Саме на цей стадії можна вживати заходів для недопущення прояву зсуву.



темно-сіра область відповідає інтервалу тріщиноутворення;
 світло-сіра область відповідає повному руйнуванню зразка.

Рис. 1. Природне імпульсне електромагнітне випромінювання, що виникає при руйнуванні зразків піщаників [2].

Аналіз сигналу

Геофізична апаратура, яка застосовується для реєстрації ПЕМПЗ, дозволяє вивчати не тільки кількість електромагнітних імпульсів, але й вивчати їх форму. Найбільш типовою є форма, наведена на рис. 2, отже, її виділення серед інших форм дозволить казати про загальну кількість імпульсів. Зазвичай, це виконується вручну, шляхом візуального перегляду та аналізу графіків, отриманих для кожної точки зйомки ПЕМПЗ. Це

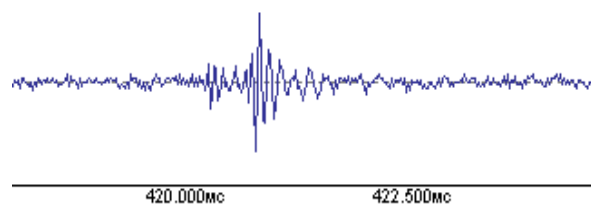


Рис. 2. Типова форма електромагнітного імпульсу ПЕМПЗ

призводить до підвищення помилок, а при великому обсягу досліджень взагалі унеможливує виділення імпульсів. Тому виникла необхідність автоматизувати аналіз графіків ПЕМПЗ шляхом розробки спеціалізованого програмного забезпечення.

Форма сигналу ПЕМПЗ (який у подальшому будемо позначати як \bar{h}_n) має характерний вигляд.

Для виділення сигналу ПЕМПЗ було запропоновано використовувати систему фільтрів на основі методу спектральної інверсії. Нехай вхідний сигнал (наприклад, рис. 3) x_n розкладається на високочастотну \tilde{x}_n та низькочастотну складові \bar{x}_n : $x_n = \bar{x}_n + \tilde{x}_n$. Для отримання низькочастотного сигналу будемо використовувати фільтр з ядром \bar{h}_n , тобто, $\bar{x}_n = x_n * \bar{h}_n$. Використовуючи властивість згортки: $x_n = x_n * \delta_n$,

де $\delta(t)$ — дельта функція в нулі та $\delta_n = \delta(t-n)$, маємо $\tilde{x}_n = x_n - \bar{x}_n = x_n * \delta_n - x_n * \bar{h}_n = x_n * (\delta_n - \bar{h}_n)$, тобто ядро фільтру високих частот $\tilde{h}_n = \delta_n - \bar{h}_n$. Таким чином, ядро фільтру високих частот отримується з ядра фільтру низьких частот з тією ж частотою, шляхом додавання до δ -функції інвертованого ядра низькочастотного фільтру.

Послідовна фільтрація вхідного сигналу N раз, де N — довжина носія \bar{h}_n дозволяє ефективно виділити місце і час руйнування породи ґрунту.

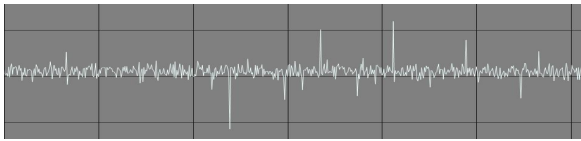


Рис. 3. Сигнал з наявною частотою, яка відповідає руйнуванню породи

Але, необхідно зазначити, що у разі, коли процес руйнування проходить у зоні активної технологічної діяльності, на сигнал накладається технологічний шум. Як правило, він має періодичний характер, що може бути результатом роботи компресорів, двигунів, діяльністю стільникового зв'язку та ін. (див. рис. 4)

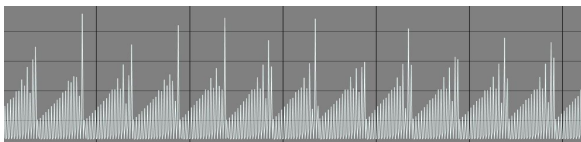


Рис. 4. Сигнал з періодичним шумом

Фільтрація періодичних технологічних шумів

Таким чином, першим кроком для того, щоб знайти типову форму електромагнітного імпульсу ПЕМПЗ, треба провести чистку сигналу від періодичного технологічного шуму.

З цією метою було запропоновано використати дискретне косинус-перетворення в якості методу фільтрації періодичних даних.

Дискретне косинус-перетворення (DCT) перетворює скінченну послідовність N дійсних чисел

h_0, h_1, \dots, h_{N-1} в іншу скінченну послідовність N дійсних чисел H_0, H_1, \dots, H_{N-1} за правилом

$$H_0 = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} h_i, \quad H_k = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=0}^{N-1} h_i \cos \frac{\pi k(2i+1)}{2N} \quad (k=1, 2, \dots, N-1),$$

до того ж, має місце зворотне перетворення

$$h_k = \frac{1}{\sqrt{N}} H_0 + \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=1}^{N-1} H_i \cos \frac{\pi i(2k+1)}{2N} \quad (k=0, 1, \dots, N-1).$$

Для фільтрації періодичних даних запропоновано наступний алгоритм. Для множини даних x_i ($i = 0, 1, \dots, n-1$) виберемо число $N \ll n$, тоді нехай $K = [n/N]$ (де $[\cdot]$ — ціла частина числа). Знайдемо множину коефіцієнтів дискретного косинус-перетворення

$$H_{0,j} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} x_{i+jN},$$

$$H_{k,j} = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=0}^{N-1} x_{i+jN} \cos \frac{\pi k(2i+1)}{2N} \quad (k=1, 2, \dots, N-1), (j=0, 1, \dots, K).$$

Та отримаємо середнє значення отриманих коефіцієнтів

$$\bar{H}_k = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^{K-1} H_{k,i}, \quad (k=0, 1, \dots, N-1).$$

Тоді відновлення значення сигналу, які відповідають даним коефіцієнтам Фур'є будуть дорівнювати

$$\tilde{x}_{k+jN} = \frac{1}{\sqrt{N}} \bar{H}_0 + \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=1}^{N-1} \bar{H}_i \cos \frac{\pi i(2k+1)}{2N} \quad (k=0, 1, \dots, N-1), (j=0, 1, \dots, K).$$

Помилка відновлення сигналу на кожному проміжку $[jN, (j+1)N]$ ($j = 0, 1, \dots, K$) буде дорівнювати

$$\varepsilon_{N,j} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (x_{i+jN} - \tilde{x}_{i+jN})^2}$$

і загальна похибка буде

$$\varepsilon_N = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{i=0}^{K-1} \varepsilon_{N,i}^2}.$$

Виберемо \tilde{N} таке, що $\min_N \varepsilon_N = \varepsilon_{\tilde{N}}$, тобто, для періоду \tilde{N} помилка буде мінімальна і даний період найбільш відповідає періоду технологічних завод. Прибираючи отримані періодичні шуми

$$y_{i+j\tilde{N}} = x_{i+j\tilde{N}} - \tilde{x}_{i+j\tilde{N}},$$

отримаємо сигнал, очищений від періодичного технологічного шуму (див. рис. 5).

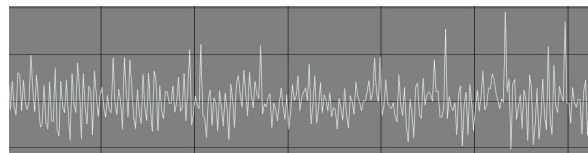


Рис. 5. Сигнал очищений від періодичного шуму



Рис. 6. Результат фільтрації очищеного сигналу за допомогою згортки з типовим електромагнітним імпульсом ПЕМПЗ

