

В.В. Бойко, д.т.н., проф.

В.А. Лемешко, інженер

Т.В. Хлевнюк, к.т.н.

О.М. Чала, к.т.н.

Д.В. Хлевнюк, к.т.н.

Інститут гідромеханіки НАН України

## Вибір апаратурних комплексів для дискретизації аналогового сигналу під час проведення промислового вибуху

Досліджено дискретизацію аналогового сигналу, що був отриманий від сейсмічного приймача СМ-3 під час проведення промислового вибуху. Інформація про сейсмічні коливання ґрунту в основі будівель і елементів самих споруд фіксувалась у вигляді осцилограм за допомогою персональних комп'ютерів типу ноутбук у комплекті зі стандартними сейсмоприймачами типу СМ-3 та швидкодіючими аналогово-цифровими перетворювачами типів Е-140 та Е-440. Оскільки в районах розміщення охоронних об'єктів майже постійно у сигналі зустрічаються фонові переешкоди (на частоті 20–50 Гц) і вони збігаються із робочим діапазоном стандартних сейсмоприймачів типу СМ-3 (від 0,5 до 50 Гц), то при вимірюванні сейсмічних хвиль цим комплексом потрібно застосовувати дискретизацію фонових переешкод, використовуючи метод низькочастотної фільтрації сигналів. Саме тому усі осцилограми, отримані під час промислових вибухів, мають фільтруватися на частоті 20–50 Гц. І лише після фільтрації отриманих сейсмограм можна проводити оцінку сейсмічної безпеки даних вибухів. Також під час проведення сейсмовимірвальних робіт для запису і порівняння протоколів сейсмічних вимірів використовували канадський комплекс MiniMate Plus. Таким чином, у роботі показано результати фільтрації аналогового сигналу та обґрунтовано доцільність спільного використання системи «сенсори – аналого-цифровий перетворювач – ноутбук» і комплексу MiniMate Plus.

**Ключові слова:** дискретизація; сейсмічний датчик; промисловий вибух; цифровий фільтр.

**Вступ.** Щільна забудова території України, велика кількість кар'єрів і постійне прагнення до збільшення потужності масових вибухів – ось основні передумови робіт з підвищення точності результатів сейсмічних вимірів, бо за ними у кінцевому підсумку розраховуються маси зарядів і схеми їх підривання. У той же час постійне збільшення вартості буропідричних робіт (БПР) призводить до збільшення потужності вибухів у кар'єрах. Крім цього, розкид часу спрацьовування неелектричних систем підривання іноді призводить до незапланованого часу ініціювання суміжних свердловинних зарядів, що, в свою чергу, веде до накладання сейсмічних коливань. З іншого боку, розвиток обчислювальної і цифрової апаратури удосконалює процес отримання та обробки осцилограм. Таким чином, оптимізація БПР, а отже, розвиток засобів і методів контролю сейсмоколивань, є актуальними завданнями.

**Мета роботи** – дослідження вибору дискретизації сигналу та подальша схема його обробки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1, 2] окреслено проблеми з удосконалення апаратури для сейсмічних спостережень, а саме питання дискретизації і фонових переешкод під час вимірювання сигналу, який проходить через нелінійне середовище. Це, в свою чергу, призводить до появи кратних частот.

Величиною дискретизації, яка буде достатньою для запису сейсмічних хвиль, є 0,001 секунди. В [3] зазначено таблицю максимального часу запису на сейсмометричний комплекс MiniMate Plus залежно від дискретизації при роботі зі стандартним комплектом сенсорів, тобто з 1 сенсором Standard 714A0301 (кількість каналів – 3) та вимірвальним мікрофоном. При дискретизації 1024 вимірювань в секунду максимальний час вимірювання становить 104 секунди (при дискретизації 2048 – 52 секунди). Пам'яті цього комплексу (1 МВ) зазвичай вистачає, але бувають випадки, наприклад, на Полтавському ГЗК в Комсомольському, коли її замало. Можна або збільшити пам'ять приладу, або використати схему: сенсори – аналого-цифровий перетворювач – комп'ютер, де в програмах вводу та зберігання інформації відведено значно більше місця (в програмі L-Graph-2 відведено 2 GB). Також важливим є те, що для вимірювання швидкості розповсюдження сейсмічної хвилі і для розрахунку декремента затухання коливання середовища «необхідно мати 5–7 точок спостереження» [4] на лінійному профілі. Не кожна організація може купити 5 комплектів, наприклад MiniMate Plus. Саме тому буде доцільно використовувати систему «сенсори – аналого-цифровий перетворювач – комп'ютер типу ноутбук».

В [5] розглянута чисельна корекція сейсмограм. У цій роботі розглядався сигнал в діапазоні від 0,01 до 10 Гц, і метою було розширення частотного діапазону в напрямку низьких частот, що характерно для землетрусів. Розглянувши дані експериментальних результатів [5], можна зазначити, що в одному експерименті (два датчики СМ-3 і два геофони GS-20DX встановлені в підвалі будівлі) дискретизація реалізації була вибрана 100 Гц при часі запису 15 хв. У другому експерименті два датчики (СМ-3 і GS-20DX) були встановлені на постаменті. Реєстрація, з частотою опитування 200 Гц, проводилася на триканальну сеймостанцію «ТІМ». Зазначимо, що в паспорті приймача СМ-3 вказується робочий діапазон частот від 0,5 до 50 Гц. Та під час дослідження впливів промислових вибухів потрібно розглядати сигнал в усьому робочому діапазоні частот.

В [6] наведено швидкості розповсюдження об'ємних та поверхневих хвиль:

- швидкість розповсюдження повздовжніх хвиль дорівнює:

$$C_1 = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)\rho}}; \quad (1)$$

- швидкість розповсюдження поперечних хвиль дорівнює:

$$C_2 = \sqrt{G/\rho} = C_1 \cdot \sqrt{1-2\mu}/2(1-\mu); \quad (2)$$

- швидкість розповсюдження поверхневих хвиль (хвиль Релея) дорівнює:

$$C_3 = 0,9194 \cdot C_2 = 0,9194 \cdot \sqrt{G/\rho}; \quad (3)$$

де  $E$  – модуль пружності;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $G$  – модуль зсуву;  $\rho$  – щільність ґрунту.

Енергію руху має кожна з цих хвиль. Для аналізу дії сейсмічних хвиль на об'єкт, що охороняється, необхідно експериментально виокремити амплітудно-частотні характеристики коливання частинок середовища під дією всіх трьох типів хвиль, швидкість розповсюдження сейсмічних хвиль, а також коефіцієнт затухання дії сейсмічних хвиль.

В [7] авторами побудовано шкалу інтенсивності сейсмічних хвиль залежно від періоду власних коливань споруд  $T_0$  і декременту загасання  $\lambda$ . Розрахуємо частоту коливань ґрунту поблизу будівлі, користуючись даними таблиці [7] ( $T/T_0 = 0,0625$ , де:  $T$  – період коливань ґрунту, с;  $T_0$  – період власних коливань споруди, с).

Таким чином,  $T = 0,0625 \cdot T_0$ , де значення  $T_0$  з джерела [4] становлять 0,2; 0,3 та 0,4 (с). Отже:  $T = 0,0625 \cdot T_0 = 0,0625 \cdot 0,2 = 0,0125$  (с), що відповідає  $f = 1/T = 80$  (Гц). А при  $T_0 = 0,4$ ,  $f = 40$  (Гц).

Але чи вистачить дискретизувати зареєстровані дані на 100 або 200 Гц?

**Результати дослідження.** Відомо, що для сигналу з найвищою частотою  $f_c$  потрібна частота проходження значень вибірки більша, ніж частота Найквіста ( $2 \cdot f_c$ ) [8, 1]. Також відомо, що для передачі синусоїди без спотворень число точок  $N$  в інтервалі від 0 до  $2\pi$  має бути не менше 26 [6, 1]. Тоді крок дискретизації  $dt$  буде дорівнювати:  $dt = 1/(N \cdot f_c) = 1/(26 \cdot 50) = 0,00076$  (с). Враховуючи вимоги стандартів щодо обчислювальної техніки, обираємо  $dt = 0,0005$  с, що відповідатиме частоті опитування  $f = 2$  кГц. На рисунку 1 показано сімейство осцилограм, отримане за допомогою приладів СМ-3 і Е14-440 з кроком дискретизації  $dt = 0,0005$  с під час проведення промислового вибуху в Рокитнянському кар'єрі гранітів [1].

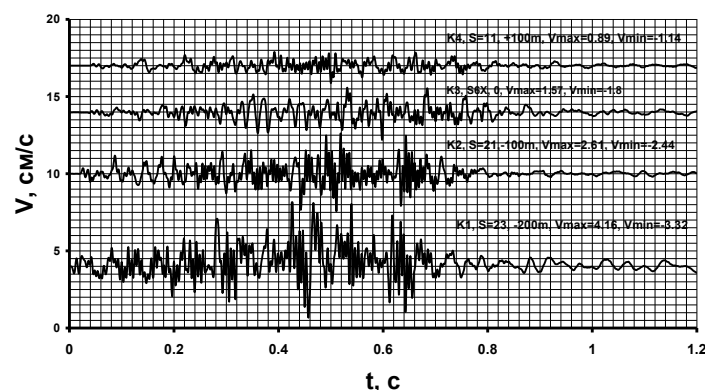


Рис. 1. Сімейство осцилограм, отриманих під час МВ в Рокитнянському кар'єрі гранітів

Окрім вказаних датчиків в нульовій точці (біля житлового будинку), був розміщений автономний комплекс MiniMate Plus, який укомплектований трикоординатним геофоном з характеристиками: роздільна здатність – 0,127 мм/с; дискретизація 4096 опитувань в секунду [3, 1]. Також у складі комплексу наявний фільтр низьких частот, тобто високі частоти придушуються. На рисунку 2 показано осцилограми, що записані цим комплексом.

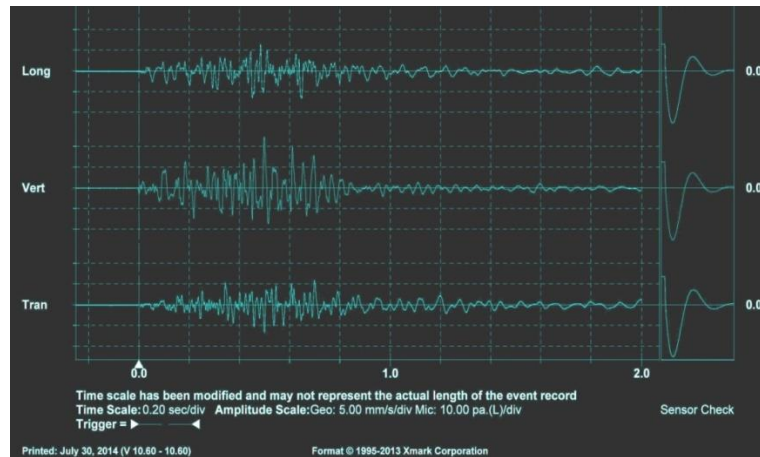


Рис. 2. Осцилограми, отримані за допомогою комплексу MiniMate Plus, встановленого в нульовій точці під час МВ в Рокитнянському кар'єрі

Порівняємо осцилограми на рисунках 1 і 2. На осцилограмах, які показано на рисунку 1, добре видно високочастотні складові. Це має підтвердження при спектральному аналізі даних осцилограм (рис. 3). Ще одна відмінність – це збільшене значення амплітуд швидкостей на рисунку 1 порівняно з рисунком 2. Це можна пояснити накладенням високочастотних сигналів на низькочастотні [1].

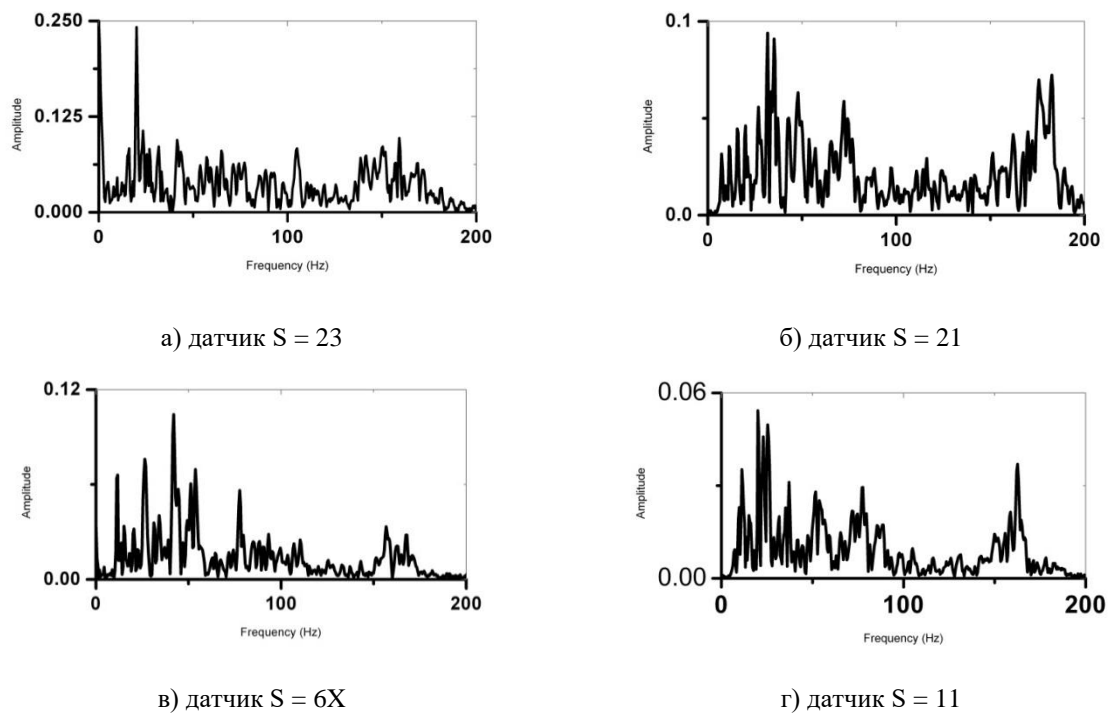


Рис. 3. Спектральний аналіз осцилограм, показаних на рисунку 1

Профільтруємо сигнали від датчика СМ-3, який розміщений в нульовій точці (рис. 1). Як граничну частоту взято відповідно частоти 100, 50, 25 і 12 (Гц) [1]. Результати показано на рисунку 4, з якого видно як, відповідно до граничної частоти фільтру, зменшуються значення одного і того ж сигналу [1].

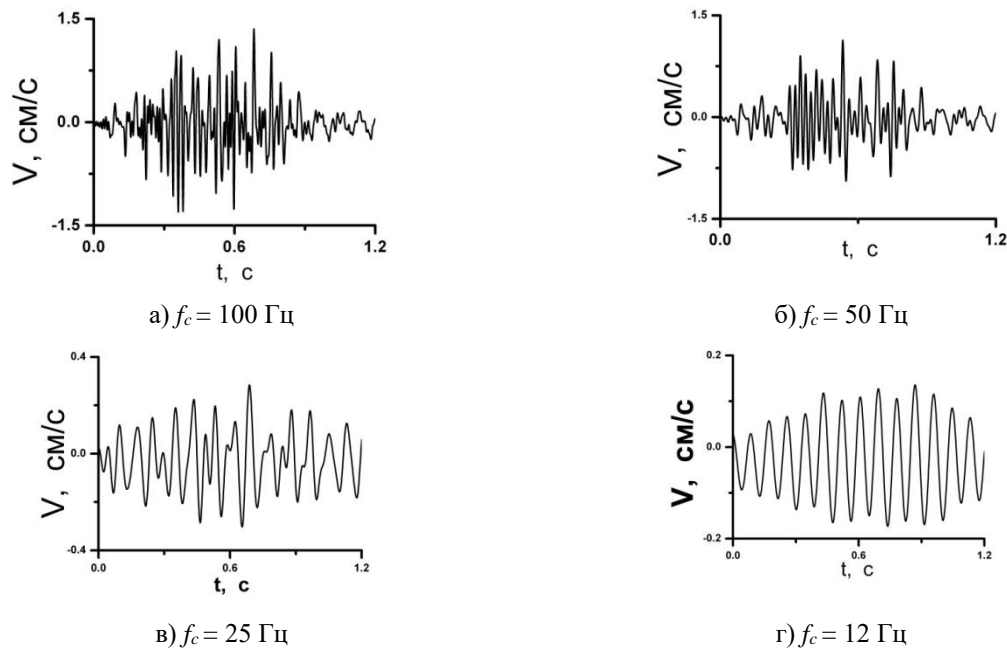


Рис. 4. Фільтрація сигналу від датчика  $S = 6X$

На нашу думку, не потрібно встановлювати частоту фільтрації вище за 50 Гц, оскільки датчик СМ-3 має робочий частотний діапазон від 0,5 до 50 Гц. Також є доцільним, аналізуючи вплив МВ на охоронний об'єкт, задавати обмеження частоти фільтрації відповідно до частот власних коливань будівлі. І потім вирішувати щодо допустимих параметрів вибуху відповідно до таблиці [7].

Розглянемо, як фільтрація осцилограм впливає на оптимізацію виконання БПР. Проаналізуємо результати сейсмометричних вимірювань параметрів сейсмовибухових хвиль (СВХ) від масового вибуху (МВ) в Рокитнянському кар'єрі. Проведемо аналіз осцилограми, записаної в нульовій точці в основі підвалин цегляного одноповерхового житлового будинку з наявними тріщинами в кутах і несучих стінах споруди.

Критерієм сейсмічної безпеки будівель і споруд, що забезпечує їх збереження під час ВР, є допустима швидкість сейсмічних коливань ґрунту в основі їх підвалин ( $U_0$ , см/с), яка, відповідно до таблиці 4 ДСТУ-П 4704: 2006 [9] без урахування частотних характеристик сейсмічної хвилі і даної охоронної будівлі, дорівнює 1 см/с [1].

Отже, дійсне коливання частинок ґрунту з первинного запису осцилограм під час короткосповільненого підривання (КСП) МВ визначити майже неможливо. Оскільки при поширенні хвиль різних типів, у результаті інтерференційних явищ, високочастотні і низькочастотні коливання накладаються між собою. В результаті ми отримуємо осцилограми подібні до рисунка 1, з яких важко визначити період коливань. Як видно з рисунка 3, у хвильовому процесі присутні високочастотні коливання (до 200 Гц), які знижують якість запису, оскільки сейсмоприймачі СМ-3 працюють у робочому діапазоні частот від 0,5 до 50 Гц. Також запис спотворює і реєструюча апаратура, за її невідповідності складу коливального процесу. Тому у таких випадках потрібно фільтрувати сигнал (рис. 4) [1].

Проведемо аналіз результатів фільтрації на частоті 50 Гц (рис. 4, б) [1]. Осцилограму було записано сейсмоприймачем, що встановлений на підвалинах вказаної будівлі. Профільтрувавши запис, встановили, що період коливання ґрунту з максимальною амплітудою 1,2 см/с відповідає 0,03 с [1]. Для визначення допустимої швидкості коливань цієї житлової будівлі (см/с) з урахуванням частотних характеристик системи «ґрунт – будівля» для формули (6) ДСТУ 7115: 2009 [10] є всі дані [1]:

$$U_{дон} = U_0 \frac{T_0^2}{T_{см}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi \lambda_0 \cdot U_{б\gamma d}}}, \quad (4)$$

де  $U_0$  – допустима швидкість коливання ґрунту в основі будівлі ( $U_0 = 1$  см/с);

$T_0$  – період власних коливань будівлі (табличні дані = 0,3 с);

$T_{см}$  – період коливань стандартного маятника (паспортні дані = 0,25 с);

$\lambda_0$  – логарифмічний декремент загасання будівлі (табличні дані = 0,3);

$U_{б\gamma d}$  – амплітудно-частотна характеристика системи «ґрунт – будівля»:

$$U_{\text{доп}} = \left[ \left( 1 - \frac{T^2}{T_0^2} \right)^2 + \frac{4\lambda_0^2}{\pi^2 + \lambda_0^2} \cdot \frac{T^2}{T_0^2} \right]^{-1/2}, \quad (5)$$

де  $T$  – період коливань ґрунту, с.

Провівши розрахунки, отримаємо  $U_{\text{доп}} = 1,85$  см/с. Тому у випадку, коли частотні характеристики будівлі і ґрунту далекі від резонансної області коливань, їх взаємодія невелика і критерій сейсмобезпеки можна підвищити [1].

Приведемо формулу Садовського до вигляду:

$$Q_{\text{доп}} = \left( \frac{U_{\text{доп}}}{K} \right)^{3/n} \cdot r^3, \quad (6)$$

де  $Q_{\text{доп}}$  – допустима маса ВР на один ступінь уповільнення при КСП, кг,

$n$  – коефіцієнт загасання хвилі;

$K$  – коефіцієнт пропорційності;

$r$  – відстань від місця вибуху до об'єкта, що охороняється, м.

Визначимо залежність маси заряду від відстані і допустимої швидкості коливань житлової будівлі (таблиця 1). З таблиці видно, що, маючи однакові значення критеріїв сейсмобезпеки, можуть виникнути ситуації, при яких не є можливим варіювання масою заряду. А при фільтруванні осцилограм можлива більш повна їх обробка. Це дасть можливість розробити рекомендації для ефективного ведення вибухових робіт.

Таблиця 1

Допустима маса зарядів ВР при КСП

Відстань до об'єкта, що охороняється, м		300	400	500
Допустима маса заряду, кг	$U_0 = 1,1$ см/с	88	210	410
	$U_{\text{доп}} = 1,85$ см/с	440	1000	2000

**Висновки.** Для заміру сейсмічних хвиль потрібно використовувати: вздовж лінійного профілю 15 однокоординатних (3 однонаправлені · 5 точок), чи 5 трикоординатних сенсорів; аналого-цифрові перетворювачі типу Е14-440 – 2 комплекти, комп'ютери типу ноутбук – 2 шт.; для контролю комплекс MiniMate Plus. Крім того, зв'язок між сенсорами та аналого-цифровими перетворювачами треба забезпечити антивібраційним кабелем типу АВКД. Для уникнення збільшення значень сейсмічного сигналу внаслідок накладання височастотних коливань, потрібно з нього відфільтрувати височастотну складову. Проводячи аналіз результатів фільтрації, не можна перевищувати граничну паспортну частоту сейсмоприймача (для СМ-3 це 50 Гц). При аналізованні впливу СХ на будівлю, яка охороняється, варто робити додаткове фільтрування отриманих осцилограм.

#### Список використаної літератури:

1. Хлевнюк Д.В. Розробка методу оцінки сейсмічного ефекту короткосповільненого підривання у кар'єрах для сейсмічної безпеки навколишніх будівель і споруд : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.03 / Д.В. Хлевнюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ, 2020. – 143 с.
2. Николаев А.В. Заметки на полях : сб. научн. трудов ИДГ РАН / А.В. Николаев. – 2012. – Вып. 3. – С. 172–175.
3. MiniMate Plus Operator Manuel [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.instantel.com.
4. Бойко В.В. Проблеми сейсмічної безпеки вибухової справи у кар'єрах України / В.В. Бойко. – К. : ТОВ «Видавництво Сталь», 2012. – 235 с.
5. Численная коррекция сейсмограмм и шумы измерительного канала : сб. научн. трудов ИДГ РАН / А.Н. Беседина, Н.В. Кабыченко, Г.Г. Кочарян, Д.В. Павлов. – 2011. – Вып. 2. – С. 100–107.
6. Сейсмическая безопасность при взрывных работах / В.К. Совмен, Б.Н. Кутузов, А.А. Марьясов и др. – М. : Горная книга, 2012. – 228 с.
7. Бойко В.В. Оценка сейсмобезопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учетом их спектральных характеристик / В.В. Бойко, А.А. Кузьменко, Т.В. Хлевнюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Гірництво. – К. : НТУУ «КПІ», 2008. – Вып. 16. – С. 3–13.
8. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж.Бендат, А.Пирсол. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
9. Правила проведення гірничих вибухів. Норми безпечності сейсмічних коливань ґрунту : ДСТУ-П 4704: 2006. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с.
10. Вибухи промислові, методи визначення фактичної сейсмостійкості будівель і споруд : ДСТУ 7116:2009. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 6 с.

**References:**

1. Hlevnjuk, D.V. (2020), «Rozrobka metodu ocinky sejsmichnogo efektu korotkospovil'nenogo pidryvannja u kar'jerah dlja sejsmichnoi' bezpeky navkolysnih budivel' i sporud», Ph.D. Thesis of dissertation, 05.15.03, KPI im. Igorja Sikors'kogo, Kyi'v, 143 p.
2. Nikolaev, A.V. (2012), *Zametki na polyah*, Sb. nauchn.trudov IDG RAN, Issue 3, pp. 172–175.
3. MiniMate Plus Operator Manuel, [Online], available at: [www.instantel.com](http://www.instantel.com)
4. Bojko, V.V. (2012), *Problemy sejsmichnoi' bezpeky vybuhovoi' spravy u kar'jerah Ukrainy*, TOV «Vydavnytvo Stal'», K., 235 p.
5. Besedina, A.N., Kabychenko, N.V., Kocharyan, G.G. and Pavlov, D.V. (2011), *Chislennaya korrekciya sejsmogram i shumy izmeritel'nogo kanala*, Sb. nauchn. trudov IDG RAN, Issue 2, pp. 100–107.
6. Sovmen, V.K., Kutuzov, B.N., Mar'jasov, A.A. et al. (2012), *Seismicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh*, Gornaya kniga, M., 228 p.
7. Bojko, V.V., Kuz'menko, A.A. and Hlevnjuk, T.V. (2008), «Otsenka seismobezopasnosti sooruzhenii pri vozdeistvii na nikh vzryvnykh voln s uchetom ikh spektral'nykh kharakteristik», *Visnyk NTUU «KPI»*, Serija Gimnyctvo, NTUU «KPI», K., Issue 16, pp. 3–13.
8. Bendat, Dzh. and Pirsol, A. (1989), *Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh*, Mir, M., 540 p.
9. «Pravyla provedennja gimnychyh vybuhiv. Normy bezpechnosti sejsmichnyh kolyvan' g'runtu» (2007), *DSTU-P 4704:2006*, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, K., 9 p.
10. «Vybuhy promyslovi, metody vyznachennja faktychnoi' sejsmostijkosti budivel' i sporud» (2010), *DSTU 7116:2009*, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, K., 6 p.

**Бойко** Віктор Вікторович – доктор технічних наук, професор, завідувач науково-дослідної лабораторії Інституту гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна.

<https://orcid.org/0000-0003-3443-1688>.

Наукові інтереси:

– підвищення оцінки безпеки будівель і споруд від багатоблокових МВ;

– дискретизація аналогових сигналів.

E-mail: [seismic-control@ukr.net](mailto:seismic-control@ukr.net).

**Лемешко** Володимир Анатолійович – інженер Інституту гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна.

Наукові інтереси:

– фільтрація сейсмограм, одержаних аналогово-цифровою апаратурою.

**Хлевнюк** Тамара Вікторівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна.

<https://orcid.org/0000-0001-8024-1864>.

Наукові інтереси:

– оцінка сейсмічних вибухів по методу одиничного свердловинного заряду.

**Чала** Ольга Миколаївна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна.

<https://orcid.org/0000-0002-8247-0908>.

Наукові інтереси:

– підвищення надійності оцінки сейсмобезпеки ґрунтових укосів під час техногенних вибухів.

**Хлевнюк** Денис Вікторович – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна.

<https://orcid.org/0000-0003-0328-2579>.

Наукові інтереси:

– підвищення оцінки безпеки будівель і споруд від масових промислових вибухів.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2021.