

## Вивчення властивостей п'єзоелектричного датчика KD-35 на калібрувальному пристрої методом зовнішнього імпульсу та на реальній трасі

© С. В. Щербіна<sup>1</sup>, Ю. В. Лісовий<sup>1</sup>, А. І. Фещенко<sup>1</sup>, О. І. Бріцький<sup>2</sup>, 2016

<sup>1</sup>Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна

Надійшла 3 жовтня 2016 р.

Представлено членом редколегії Д. М. Гринем

Микросейсмический мониторинг массивов горных пород, например шахт, позволит получить данные о состоянии массива на границах отработанных пространств при различных уровнях выполнения горных работ. Основными проблемами мониторинга являются отсутствие информации о состоянии массива над выработанным пространством и несовершенство аппаратуры, которая должна обеспечивать высокую точность и чувствительность исследований. На примере пьезоэлектрического датчика KD-35 показано изучение его характеристик по данным лабораторных испытаний, предварительной калибровки и исследовательских полевых работ с целью изучения свойств откликов пьезодатчика (сенсора) на внешние возбудители на различных расстояниях от него.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический датчик, сенсор, акселерометр, свойства пьезодатчика, калибровка, микросейсмический мониторинг опасных объектов.

**Вступ.** Відсутність інформації про стан масиву гірських порід над виробленим простором (порожнинами), а також недосконалість апаратури є основними проблемами моніторингу. Контроль п'єзоелектричними приладами (сенсорами) через порожнини і зруйновану породу є малоефективним. За відстані в кілька сотень метрів від такого приладу до досліджуваного явища не доводиться сподіватися на визначення процесу утворення мікротріщин і навіть магістральних тріщин унаслідок малої енергії самого явища і суттєвого її загасання. Враховуючи відсутність інформації про характер порушеності масиву порід, не можна точно визначити енергію потужніших проявів «спливання», наприклад енергію відриву плит або блоків. Разом з тим відсутність інформації про характер тріщинуватості масиву не дає змоги оцінити відстань до певного явища за ступенем загасання. Саме тому висока чутливість п'єзодатчиків може забезпечувати векторизацію даних щодо проявів різноманітних явищ.

Нижче наведено види геомеханічних проявів у масиві, які бажано контролювати.

1. *Утворення мікротріщин.* Відомі прилади дають змогу контролювати інтенсивність мікроруйнування масиву за акустичною емісією. Рівень напруженого стану та інтенсив-

ність мікроруйнування оцінюють за частотою проходження акустичних імпульсів.

2. *Утворення магістральних тріщин.* Ці процеси людина може відчувати на відстані від десятків до сотень метрів як клацання. Вважають, що утворення магістральних тріщин характерно для самого масиву гірських порід. Прояв магістральних тріщин у приповерхневому шарі реалізується як викиди породи, чого допускати не можна, тому необхідно запровадити превентивний контроль.

3. *Спливання пустот.* Для контролю явища відриву великих плит і блоків необхідно використовувати трикомпонентні сенсори.

**Стан проблеми та постановка задачі.** 19 квітня 2014 р. на території Сілезького воєводства Польщі було зафіксовано землетрус магнітудою 4,0. Зникли безвісти декілька шахтарів, які на той час знаходилися в шахті «Вуек-Шленськ». За даними Геологічної служби США (United States Geological Survey), епіцентр землетрусу знаходився поблизу населеного пункту Руда-Сленська.

16 квітня 2015 р. у смт Солотвино Закарпатської обл. України провал ґрунту спричинив утворення карстової лійки розміром 60×50 м і завглибшки 45 м. Найпримітнішим є той факт, що карстова лійка утворилася поруч із Солот-

винським солерудником. Отже, забезпечення мікросейсмічного моніторингу безпосередньо на ділянках гірничих виробок або близько від них є нагальною проблемою. Виконання такого моніторингу спеціальними високочутливими приладами дасть змогу уникнути у майбутньому людських жертв.

Вивчення властивостей приладів, що мають забезпечувати високу чутливість реєстрації мікросейсмічних коливань, також є проблемним. Слід наголосити, що для забезпечення моніторингу геомеханічних процесів у масивах гірських порід насамперед потрібно вивчати властивості самого датчика (сенсора), застосовуючи різні методи для визначення рівня його чутливості, а отже, підбору якнайоптимальнішого варіанта для виконання різних завдань.

**Мета.** Демонстрація лабораторного вивчення властивостей п'єзодатчика для визначення рівня його чутливості.

**Результати досліджень.** Властивості п'єзодатчика вивчали на запатентованому калібрувальному пристрої [Пат. ..., 2013]. П'єзодатчик міцно закріплений металеву стрічкою до рухомого блока платформи (рис. 1), що рухався тільки вертикально. Вертикальний рух платформи забезпечений генератором сигналу прямокутної форми. П'єзодатчик складається з двох частин з вертикальним гвинтовим з'єднанням.

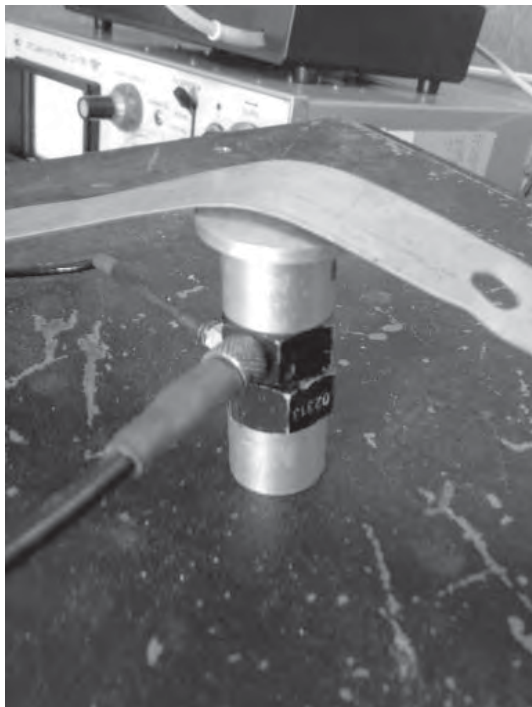


Рис. 1. П'єзодатчик KD-35 (акселерометр), установлений на рухомій частині платформи.

Для оцифрування сигналу, його контролю і збереження п'єзодатчик було з'єднано зі станцією UK16 [Щербіна, Лісовий, 2008]. Під час калібрування вхідним прямокутним сигналом з амплітудою 2,5 мкм на вхід 24-бітного АЦП подавали напругу близько 2,3 В (рис. 2). Це значення цілком припустимо для вимірювання амплітуди зовнішніх мікросейсмічних сигналів різної природи [Щербіна, 2011].

Для дослідження технічних можливостей п'єзодатчика щодо реєстрації зовнішнього сиг-

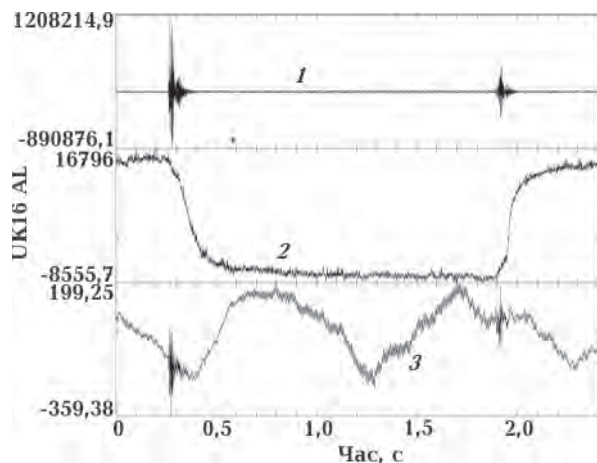


Рис. 2. Відгук п'єзодатчика KD-35 (1) на прямокутний сигнал платформи амплітудою 2,5 мкм (2), запис сейсмометра СМ-3КВ (3).

**Т а б л и ц я 1.** Вхідні зміщення платформи для п'єзодатчика

Амплітуда вхідного сигналу, мкм	Енергія сигналу, мкДж
2,5	53,13
3,3	92,57
5	212,50
10	850
20	3400
30	7650
40	13600
50	21250
70	41650
80	54400
100	85000
120	122400
140	166600
160	217600
180	275400
200	340000
220	411400
250	531250
300	765000

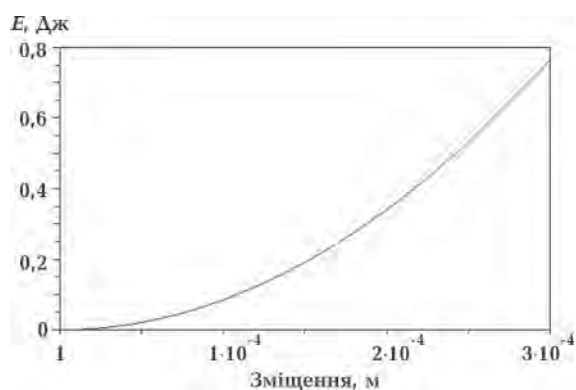


Рис. 3. Динаміка потенціальної енергії вхідного сигналу платформи на акселерометр (п'єзодатчик).

налу прилад протестовано на калібрувальному пристрої в діапазоні від 2,5 до 300 мкм (табл. 1, рис. 3, 4).

Відповідно до попереднього аналізу амплітуд прискорень, за різних амплітуд вхідного прямокутного сигналу платформи від 2,5 до 300 мкм амплітуди прискорень суттєво змінюються не за величиною (рис. 5), а за формою, що відображує реальні властивості реакції акселерометра (п'єзодатчика) на вхідні сигнали однакової форми, але різні за тривалістю. За допомогою інтегрального обчислення розраховано швидкісні відгуки акселерометра на вхідні прямокутні сигнали (рис. 6).

З метою дослідження чутливості п'єзодатчика ОПКІ-А0311-Л136-08 щодо зовнішніх впливів у роботі [Отчет..., 2011] застосовано метод, в якому використано зовнішнє пружне тіло у формі кулі для запису відгуку приладу на удар по його корпусу. У нашому дослідженні застосовано подібний метод, в якому удар зовнішнього тіла (кулі) спрямовано на точку металевої

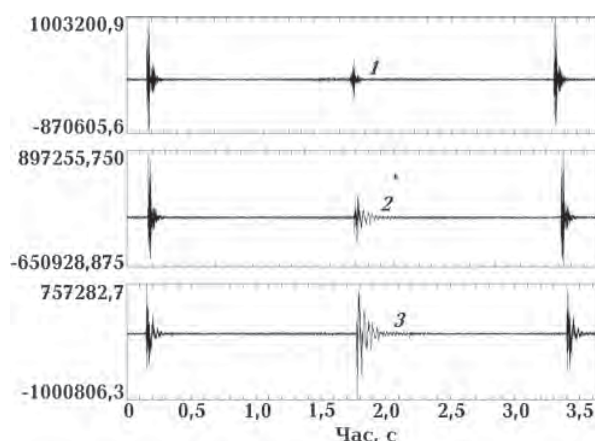


Рис. 5. Записи прискорень платформи п'єзодатчиком за амплітуд вхідного прямокутного сигналу 10 (1), 100 (2) і 300 мкм (3).

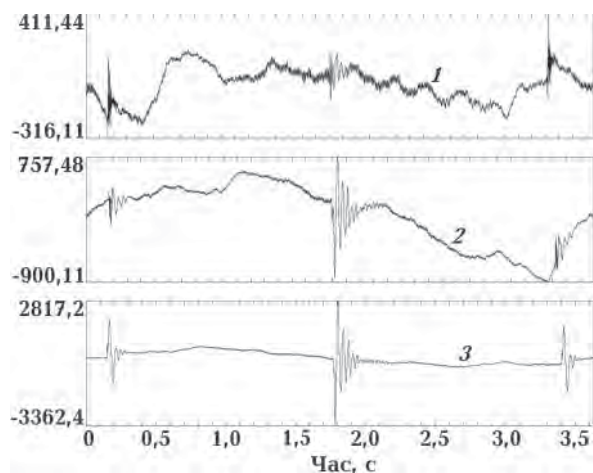


Рис. 6. Розрахункові швидкості платформи, отримані з прискорень п'єзодатчика за амплітуд вхідного сигналу 10 (1), 100 (2) і 300 мкм (3).

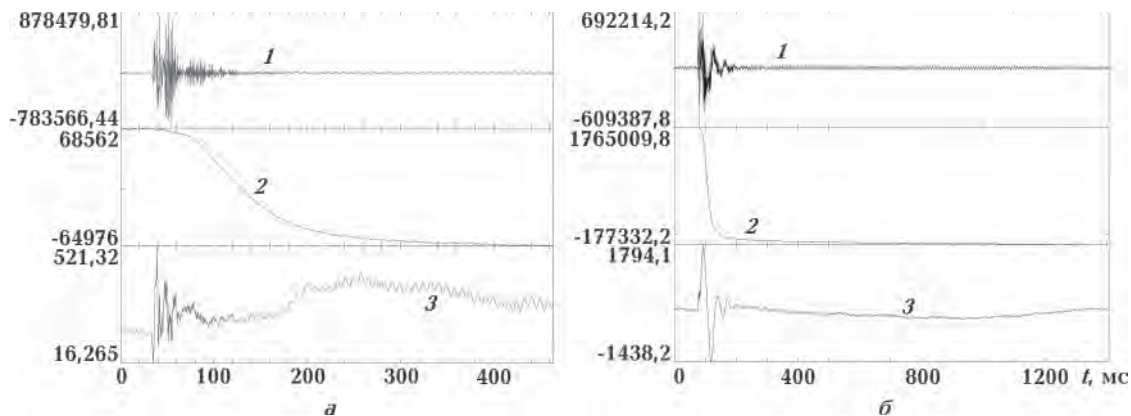


Рис. 4. Відгук п'єзодатчика KD-35 (1) на прямокутний сигнал платформи (2) і розрахована швидкість (3) за вхідного прямокутного сигналу 20 (а) і 300 мкм (б).

частини платформи, яка знаходиться на відстані 5 мм від точки розташування п'єзодатчика KD-35 (рис. 7, 8).

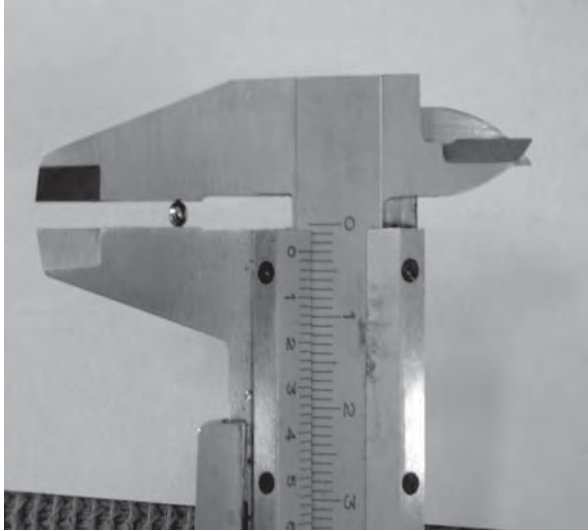


Рис. 7. Вимірювання діаметра кульки для розрахунку її маси ( $D=3$  мм).

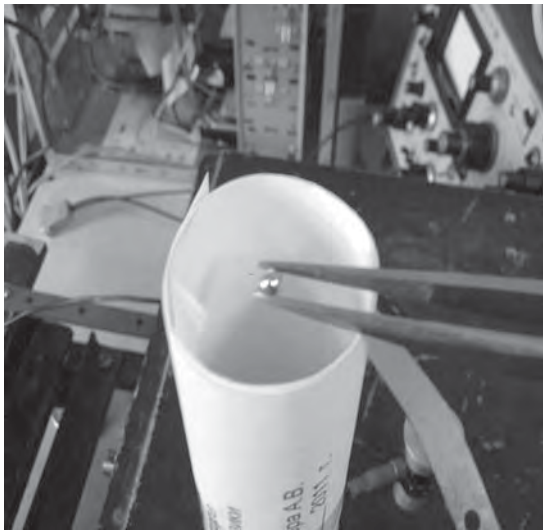


Рис. 8. Паперовий циліндр змінної довжини для вивчення статистики відгуків п'єзодатчика на удари кулі масою 0,87 г.

На рис. 9 показано відгуки п'єзодатчика на удар кульки на відстані 5 мм від приладу: видно, як зменшуються за амплітудою вільні відгуки його на затухаючі за амплітудою зовнішні впливи. Удар зовнішнього предмета по точці, яка розташована поруч з п'єзодатчиком, а не по ньому самому, є природнішим, тому в такому варіанті різкий зовнішній вплив є найточнішою і реальнішою копією природного

впливу навколишнього середовища на реєструвальний прилад, ніж удар прямо по корпусу п'єзодатчика. Іншими словами, п'єзодатчик у наведеному варіанті запису має власний відгук малого об'єму навколишнього матеріалу середовища, на якому він розташований, а не сумарний відгук власної оболонки, і малого об'єму навколишнього середовища під ним, на вібрації якого він реагує.

Результати розрахунку коефіцієнта лінійної залежності одиниць АЦП від енергії зовнішнього впливу (мкДж) у вигляді удару кульки по платформі показано на рис. 10.

Імпульсні дії падаючої кульки на п'єзодатчик здійснювали з різної висоти для вибору різних значень енергії зовнішнього впливу і кілька разів (від 7 до 10) — для набору статистичних даних у вигляді середніх значень (рис. 10). Отже, за коефіцієнтом зв'язку (16537,1 од.АЦП/мкДж) між енергією зовнішнього впливу на п'єзодатчик і його відгук на зовнішній імпульс (в одиницях АЦП) можна визначити мінімально допустиму енергію зовнішнього впливу на п'єзодатчик, значенням якої можна довіряти (табл. 2).

Як видно з результатів розрахунку відгук п'єзодатчика KD-35 є мінімально довірчим за амплітудами АЦП при енергії процесу зовнішнього впливу на нього в межах не менш як 0,01—0,03 мкДж у точці, розташованій від нього на відстані близько 5,0 мм (табл. 2). Вибір мінімальних довірчих значень енергії зовнішнього впливу на п'єзодатчик у межах 0,01—0,03 мкДж визначений властивостями самого АЦП, власний шум якого в 3 рази менший за мінімально допустимі значення (165,37) і становить 30—50 од. АЦП.

Крім лабораторних випробувань і попереднього калібрування п'єзодатчика KD-35 було

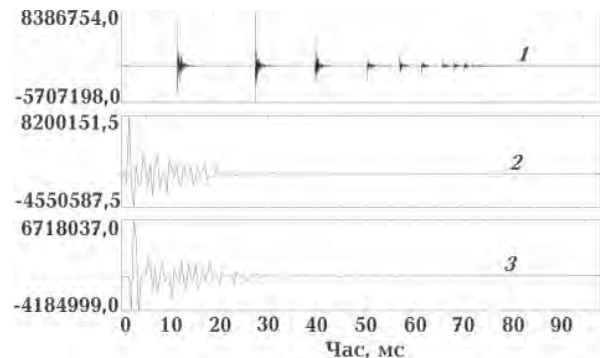


Рис. 9. Запис ударів кульки масою 0,87 г по точці, ближній до п'єзодатчика: 1 — набір самостійних затухаючих періодичних ударів кульки; 2, 3 — записи двох перших ударів кульки.

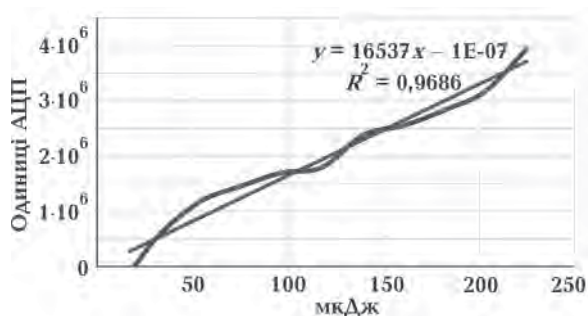


Рис. 10. Розрахунок коефіцієнта лінійної залежності відгуку п'єзодатчика (в одиницях АЦП) від енергії зовнішнього впливу  $E$  у вигляді удару кульки масою 0,87 г по точці, близької до п'єзодатчика KD-35.

проведено певні дослідні польові роботи для вивчення властивостей його відгуків на зовнішні удари металевим предметом загальною масою 8,5 кг з висоти 1 м на різних відстанях від його розташування в ґрунті до точки удару від 35 до 2 м (рис. 11, 12). Геологічну будову ділянки дослідження властивостей п'єзодатчика наведено у статті [Щербіна, Криль, 2012].

**Т а б л и ц я 2.** Розрахункові значення коефіцієнта перетворення енергії падіння кульки

$E$ , мкДж	$K$ , од. АЦП
0,010	165,370
0,030	496,110
0,050	826,850
0,070	1157,590
0,090	1488,330
0,100	1653,700
0,200	3307,400

Енергія удару в будь-якій точці спостережень від 1 до 35 м становила 83,4 Дж. Коефі-



Рис. 11. Розміщення п'єзодатчика на металевому стрижні для вивчення його властивостей на глибині в ґрунті 30—40 см.

цієнт перетворення 16537,1 од. АЦП/мкДж, розрахований для вивчення дії на п'єзодатчик малої кульки діаметром 3,0 мм і масою 0,87 г, у цьому випадку досліджень неприйнятний і має бути розрахований заново. Це зумовлено тим,

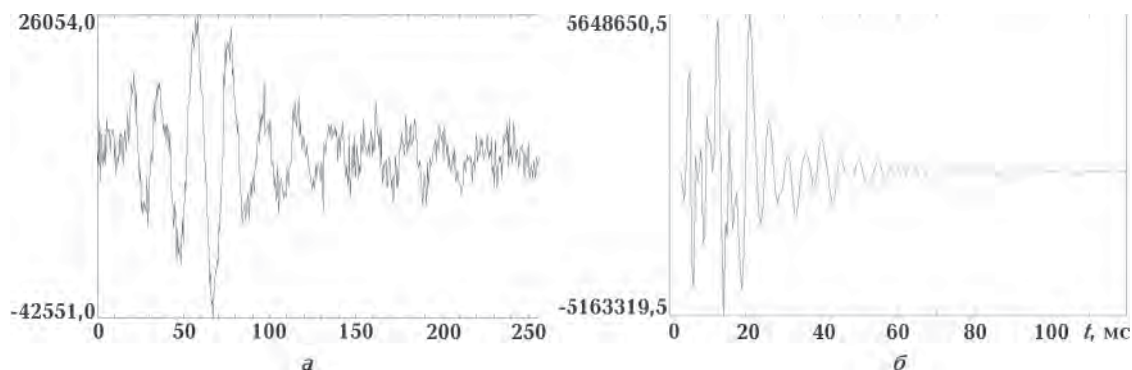


Рис. 12. Відгук п'єзодатчика KD-35 на удар предмета масою 8,5 кг на відстані 32 м (а) та 1,45 м (б) від нього.

що в такому варіанті досліджень динамічних властивостей п'єзодатчика KD-35 всі об'єкти технічної роботи були розташовані в іншому геологічному середовищі — на земній поверхні, де вимірювали відгуки п'єзодатчика KD-35 у вигляді змін одиниць АЦП на зовнішні удари по поверхні ґрунту на різних відстанях.

**Висновки.** Під час дослідження властивостей п'єзоелектричного датчика KD-35 було використано кілька методів для визначення мінімально допустимої енергії зовнішнього середовища на прилад, а також інших параметрів, за якими можна визначити його надійність. Знаючи коефіцієнт зв'язку між енергією зовнішнього впливу на п'єзодатчик і відгук на зовнішній імпульс в одиницях АЦП, можна

визначити мінімально допустиму енергію зовнішнього впливу на прилад.

Забезпечивши мікросейсмічний моніторинг на об'єктах гірничих виробок, можна попереджати різноманітні природні явища, які відбуваються безпосередньо на цих об'єктах, наприклад обвали, зсуви та ін. Попередженням виникнення таких явищ можна якщо не вберегти інфраструктуру гірничої виробки, то уникнути людських жертв, що значно важливіше. Для проведення такого моніторингу потрібно використовувати датчики з високою чутливістю. Перед застосуванням цих приладів перш за все необхідно провести їх тестування та вивчити властивості для визначення мінімального порогу сприйнятливості.

### Список літератури

*Отчет по научно-исследовательской работе «Выявление пустот в восточном борту Глеватского карьера и разработка мероприятий по безопасному ведению горных работ в зонах его подработки подземными горными работами».* ГП «НИГРИ», ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Кривой Рог, 2011. 542 с.

*Пат. 77339* Україна. Пристрій для калібрування сейсмометрів. С. В. Щербіна, О. В. Кеңдзера, Ю. В. Лісовий, А. І. Фещенко, Ф. М. Панков. Опубл. 11.02.2013 р.

Щербіна С. В. Цифрові сейсмічні реєстратори та їх калібровка. *Геофіз. журн.* 2011. Т. 33. № 2. С. 156—160.

Щербіна С. В., Криль Т. В. Аналіз спектральних характеристик вібрацій у ґрунтах на території м. Києва, спричинених рухом поїздів метрополітену. *Геол. журн.* 2012. № 2. С. 91—99.

Щербіна С. В., Лісовий Ю. В. Програмне забезпечення телеметричної системи збору та обробки мікросейсмічних даних в режимі on-line. *Геодинаміка.* 2008. № 1. С. 110—115.

## Study of the piezoelectric sensor KD-35 properties on the calibration device by the method of external pulse and on a real track

© S. V. Shcherbina, Yu. V. Lisoviy, A. I. Feschenko, O. I. Brickyi, 2016

Microseismic monitoring of rock mass, such as mines, will provide data about condition of mass on the borders of waste areas at different levels of implementation of mining. The main problems of monitoring are the information absence about condition of mass above waste areas also imperfection of equipment that should provide high accuracy and sensitivity of researches. For example of piezoelectric sensor KD-35 shows to study of one characteristics by means of laboratory test, preliminary calibration and research fieldwork for study of the properties of piezoelectric transducer (sensor) responses on external inducer sources at different distances from sensor.

**Key words:** piezoelectric sensor, transducers, accelerometer, performance of piezoelectric sensor, calibration, microseismic monitoring of dangerous objects.

### References

*The report on the research paper «Detection of voids in the eastern board Gleevatsk career and development of measures for the safe conduct of mining*

*operations in the areas of undermining its underground mining», 2011. SE «NIGRI», OJSC «Arcelor-Mittal Kryviy Rih». Krivoy Rog, 542 p. (in Russian).*

*Pat. 77339* Ukraine. Device for calibration of seismometers. S. V. Shcherbina, O. V Kendzera, Yu. V. Lisovyy, A. I. Feshchenko, F. M. Pankov. Publish. 11.02.2013 (in Ukrainian).

*Shcherbina S. V.*, 2011. Digital seismic stations and their calibration. *Geofizicheskiy zhurnal* 33(2), 156—160 (in Ukrainian).

*Shcherbina S. V., Kril' T. V.*, 2012. Analysis of the spectral characteristics of vibrations in the soil on the territory of Kiev, caused by the movement of subway trains. *Geologicheskij zhurnal* (2), 91—99 (in Ukrainian).

*Shcherbina S. V., Lisovyy Yu. V.*, 2008. The software for on-line telemetric system of microseismic data collection and processing. *Geodynamika* (1), 110—115 (in Ukrainian).