

Комплексний підхід до сертифікації та метрологічного оцінювання сучасних цифрових сейсмометричних реєстраторів

*С.В. Щербина¹, А.І. Фещенко¹, Ю.В. Лісовий¹, А.П. Іващенко²,
О.В. Адаменко², Ю.П. Сорока³, 2021*

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

²ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», Київ, Україна

³ТОВ «Роден», Київ, Україна

Надійшла 6 листопада 2020 р.

Метрологічні дослідження (півірки, вимірювання), що ґрунтуються на різних наукових і технічних досягненнях саме у сфері метрології, інтенсивно розвиваються у різних методологічних напрямках як в усьому світі, так і в Україні. Використання метрологічно сертифікованих пристроїв різного типу і з різними фізичними параметрами підвищує рівень довіри до результатів робіт. Саме тому відносно порівняння отриманих результатів дає змогу потенційним замовникам сертифікатів вибрати найефективнішу для них методику проведення робіт для отримання коректних даних. Наведено результати спільної науково-технічної роботи з розробки методології проведення процедури сертифікації калібрувального пристрою, а також результати виконання вже сертифікованого калібрувального пристрою для метрологічних визначень параметрів акселерометрів, велосиметрів та реєстраторів зміщення. Одним із важливих напрямів проведення робіт з метрології вимірювальних пристроїв у сфері сейсмології є визначення амплітудно-частотних характеристик або амплітудно-частотних і фазових характеристик різних типів реєстраторів (зміщення, швидкості або прискорення). Використання цих пристроїв у сучасних автоматизованих комплексних системах забезпечує визначення різних параметрів сейсмічних подій — як локальних або регіональних, так і телесеісмічних.

Подано результати порівняльних аналізів експериментальних робіт з визначення частотних характеристик калібрувального пристрою, отриманих в різних напрямках вимірювань — зміщення, швидкості та прискорення. Оцінено стан різних сейсмологічних реєстраторів, що дає змогу експериментально визначити наявність різного типу фізичних відмінностей в одному з діапазонів частот для реєстраторів зміщення та швидкості. Відповідність отриманого сертифіката на калібрувальний пристрій вимогам міжнародної метрологічної системи сертифікації ISO/IEC 17025 забезпечено ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ».

Ключові слова: метрологія, калібрування, сейсмометрія, акселерометри, лазер, зміщення, швидкість, прискорення.

Вступ. Основні результати отримані при проведенні науково-дослідних робіт за договором № 24120-2019 від 01.04.2020 р. між Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (ІГФ НАН України) та ТОВ «Роден» за темою «Метрологічні дослідження триканального сейсмореєстратора СР1,

призначеного для вимірювання рівня мікросейсмічної активності», які виконувалися в рамках випуску науково-технічної продукції. Триканальний сейсмореєстратор для вимірювання прискорення на основі використання акселерометра ТО-8 зі вбудованим підсилювачем 66332АР21 виробни-

цтва IMISENSOR, виготовлений ТОВ «Роден» сумісно з Інститутом проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. Калібрування сейсмореєстратора СР1, що складається з 24-бітного аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) чотириканальної системи оцифрування та трикомпонентного акселерометра [Щербина та ін., 2019б], виконано на вже сертифікованому калібрувальному пристрої, виготовленому в ІГФ НАН України, детальний опис якого наведено в двох патентах на корисну модель [Щербина та ін., 2019а; Щербина та др., 2013].

Мета роботи — отримати перехідні коефіцієнти перерахунку значень відносних одиниць для кожного з трьох каналів 24-бітного АЦП в одиниці прискорення (m/s^2). Основним початковим етапом було проведення спеціальних метрологічних робіт науковцями ІГФ НАН України разом з фахівцями відділу вимірювань параметрів руху та віброакустичних вимірювань ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» для отримання метрологічного сертифіката на калібрувальний пристрій, використання якого дасть змогу виконувати метрологічні роботи з визначення перехідних коефіцієнтів, необхідних для здійснення різних метрологічних процесів.

Використання даних метрологічних досліджень дає змогу якісно виконувати спостереження за реєстрацією сейсмічних подій техногенного походження в шахтах і кар'єрах [Щербина та ін., 2015; Здешиц та ін., 2015], а також вивчати геофізичні властивості природних процесів у зонах активних тектонічних розломів, що пронизують Криворізький басейн, та в зонах проведення гірничо-видобувних робіт на різних глибинах. Отримані дані в сукупності дають багато корисної інформації для науковців.

Отримання та інтерпретація якісної метрологічної інформації, а також її накопичення в базах даних як приклад дадуть змогу відповісти на низку питань, щодо оцінювання рівня техногенної небезпеки в рамках вивчення динаміки прискорення, яка може бути пов'язана з наслідками інтенсивного видобутку залізної руди. Одне з

головних завдань їх забезпечення необхідної якості робіт зі сертифікації калібрувального пристрою (платформи) — необхідність використання генератора спеціальних сигналів Гб-15, що забезпечує діапазон частот сигналів 0,001 — 1000 Гц. Це дуже важливий фактор для забезпечення використання цього пристрою при калібруванні різних типів пристроїв з різними частотними діапазонами. Широкі технічні можливості калібрувального пристрою на основі застосування вказаного широкопсмного генератора дають змогу використовувати різні пристрої для вимірювання амплітуд руху (зміщення) рухомої частини платформи (рис. 1, а). Дотепер у калібрувальному пристрої використовували інфрачервоний вимірювач зміщень, який було замінено на лазерний вимірювач зміщень KEYONCE LK021 [Щербина та ін., 2019а] з метою оцінювання можливостей для поліпшення якості робіт зі сертифікації та калібрування сейсмометричних комплексів (рис. 1, б).

Одночасно на рухому частину платформи було встановлено класичний горизонтальний сейсмометр ВЕГК для отримання експериментальних результатів, що забезпечують необхідні технічні можливості роботи для вивчення частотних характеристик даного пристрою, який призначений для отримання результатів вимірювання швидкостей.

Широкий діапазон частот калібрувального пристрою дав змогу охопити значення частот від 0,01 до 100 Гц, за якими визначено відгук горизонтального сейсмометра ВЕГК на значення вхідного сигналу в значеннях зміщення. Крім того, рис. 2, б ілюструє лінійне зростання значень спектра відгуків горизонтального сейсмометра ВЕГК в децибелах на вхідний сигнал в діапазоні частот від 0,01 до 100 Гц після проходження значення частоти його власного резонансу близько 0,98 Гц. Причиною цих відхилень від очікуваних результатів процесу калібрування горизонтального сейсмометра ВЕГК є прояви фізико-механічних властивостей даного пристрою, тобто він вимірює швидкість.

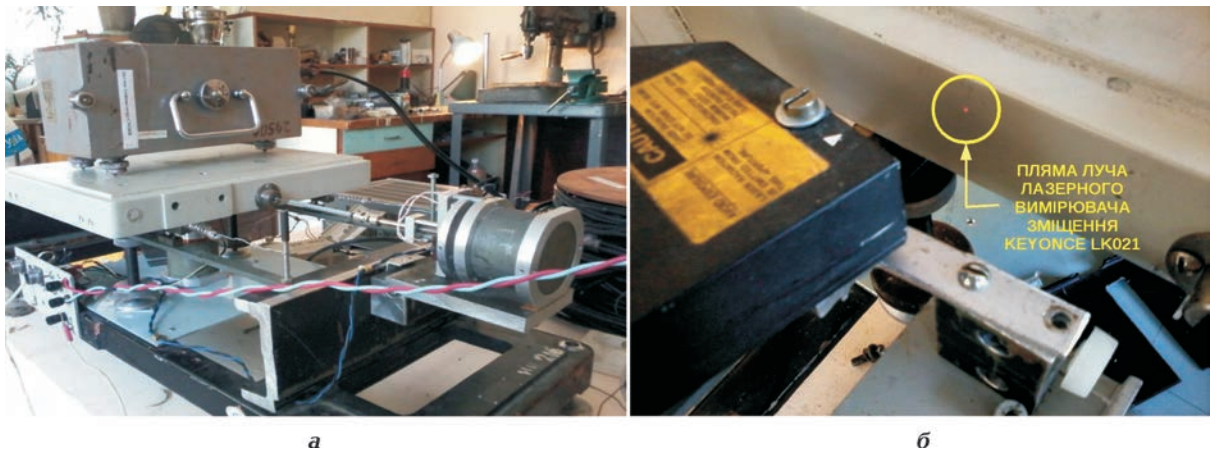


Рис. 1. Розташування горизонтального сейсмометра ВЕГІК на рухомій частині платформи для вивчення його властивостей та оцінювання якості роботи лазерного вимірювача зміщень (а). Використання лазерного вимірювача зміщень KEYONCE LK021 для вимірювання горизонтальних зміщень рухомої частини платформи [Щербина та ін., 2019а] (б).

Fig. 1. The horizontal seismometer VEGIK on the platform moving part is location for study his properties and to estimate the laser displacement meter working quality (a). Using a laser displacement meter KEYONCE LK021 for measure the horizontal displacements of the platform moving part [Щербина та ін., 2019а] (б).

За зміни частоти вхідного сигналу з платформи на цей сейсмометр зі збереженням амплітуди вхідного сигналу було виявлено, що амплітуда відгуку горизонтального сейсмометра ВЕГІК залежить від частоти в лі-

нійній формі, і це особливо спостерігається після резонансного значення сейсмометра близько 0,98 Гц (рис. 3).

На основі аналізу отриманих попередніх результатів досліджень властивостей каліб-

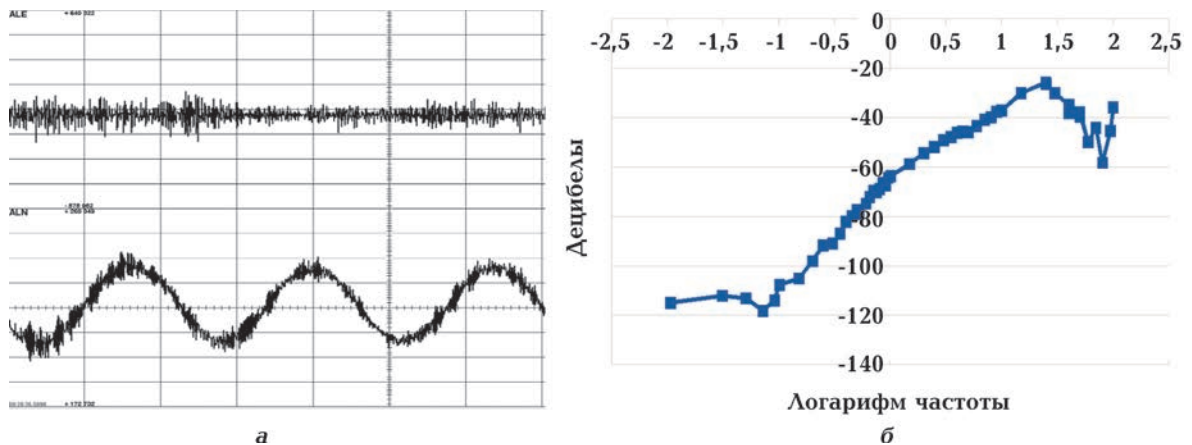


Рис. 2. Реакція горизонтального сейсмометра ВЕГІК на низькочастотний сигнал з частотою 0,02 Гц. Зверху — сейсмометр, знизу — лазерні значення зміщення (а). Значення спектра відгуку сигналу горизонтального сейсмометра ВЕГІК в децибелах у діапазоні частот від 0,01 до 100 Гц з ознаками впливу транспортного шуму в часовій області вимірювань (б).

Fig. 2. The response of the horizontal seismometer VEGIK to a low-frequency signal with a frequency 0.02 Hz. Top — seismometer, bottom — laser offset values (a). The value of the signal response spectrum of the horizontal seismometer VEGIK in decibels for frequency range 0.01—100 Hz with the influence of traffic noise features in the measurements time range (б).

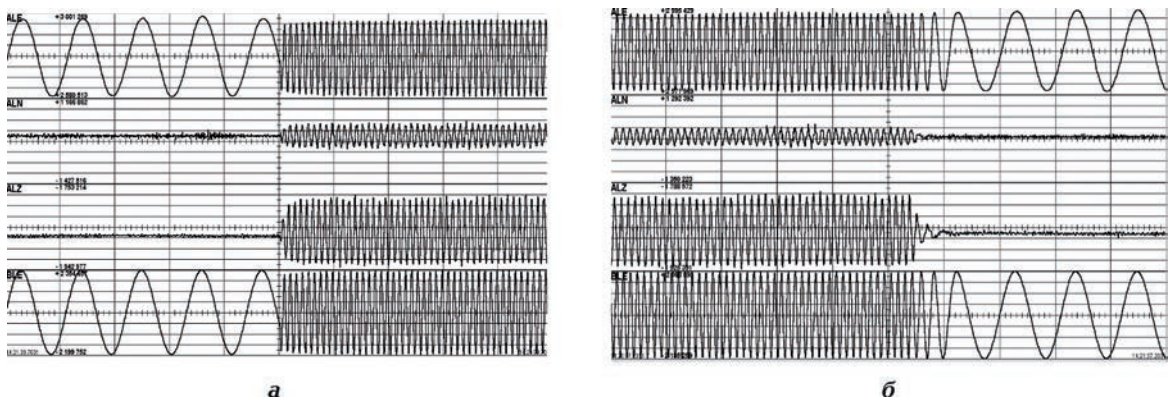


Рис. 3. Незалежність амплітуди вхідного сигналу зміщення вертикального або горизонтального напрямку руху рухомої частини платформи (верхній та нижній) і залежність від зміни частоти сигналу відгуку горизонтального сейсмометра ВЕГІК — другий знизу за зміни значень частоти вхідного сигналу на порядок від низьких до високих (а), від високих до низьких (б).

Fig. 3. Independence of the input signal amplitude for vertical or horizontal the movement direction of the platform moving part (upper and lower) and the relation from change the response signal frequency of horizontal seismometer VEGIK — the second from bottom when frequency change of the input signal from far from low to high (a) and from high to low (b).

рувального пристрою та встановленого на нього класичного горизонтального сейсмометра ВЕГІК можна зробити такі висновки: вивчення властивостей калібрувального пристрою і сейсмометра потребують проведення додаткових науково-технічних робіт, що зможе забезпечити значне поліпшення результатів проведеної роботи. Для цього необхідно вивчити властивості калібрувального пристрою, використовуючи сучасні європейські методи метрологічних досліджень, якими володіє ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», для отримання сертифіката і застосувати вже сертифікований калібрувальний пристрій до вивчення властивостей 24-бітної чотириканальної системи оцифрування та трикомпонентного акселерометра [Щербина та ін., 2019б].

Загальний опис методів. Початкові роботи з вивчення властивостей 24-бітної чотириканальної системи оцифрування та трикомпонентного акселерометра [Щербина та ін., 2019б] склалися з таких етапів: а) отримання метрологічного сертифіката на калібрувальний пристрій, що було досягнуто завдяки проведенню спеціальних метрологічних досліджень його фізико-механічних властивостей, заснованих на сучасних вимогах ДП «УКРМЕТРТЕСТ-

СТАНДАРТ»; б) отримання сертифіката на 24-бітну чотириканальну систему оцифрування з підключеним до неї трикомпонентним акселерометром.

ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», що займається метрологічними дослідженнями, є провідною науковою установою в Україні стосовно вимірювань параметрів вібрації. В 2016 р. Національне агентство з акредитації України (НААУ) провело акредитацію ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» як калібрувальної лабораторії (у тому числі вібраційних вимірювань) згідно з вимогами міжнародного стандарту ISO/IEC 17025. НААУ є повноправним членом Міжнародної спілки з акредитації лабораторій (ILAC) та підписантом Угоди про взаємне визнання (ILACMRA) за напрямками акредитації випробувальних та калібрувальних лабораторій і органів з інспектування. Акредитація, що надається НААУ, еквівалентна акредитації, що надається національними органами з акредитації у більш ніж 80 країнах світу. В 2019 р. був затверджений національний еталон України стосовно вібраційних вимірювань, який було розроблено та виготовлено в ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» на базі багатофункціональної віброкалібрувальної станції 9155D, оснаще-

ної лазерним інтерферометром виробництва фірми Modalshop, США. В 2018–2019 рр. ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» брало участь у міжнародних звіряннях національних еталонів стосовно вібраційних вимірювань CCAUV.V-K5 ВІРМ разом із національними еталонами таких країн, як Німеччина, Швейцарія, Іспанія, США, Бразилія, Мексика, Китай, Японія, Австралія, Сінгапур, Росія. Отримані результати (DraftA) підтверджують заявлені метрологічні характеристики еталона та вимірювальні можливості ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ».

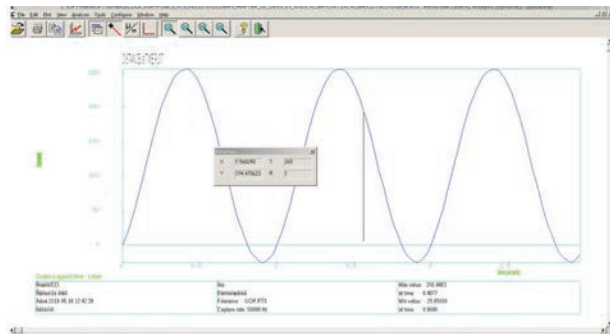
Під час метрологічних досліджень пристрою для калібрування сейсмодавачів (№ КІ-01І виробництва Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (сертифікат № UA/22/190730/001058) як основного еталонного пристрою для вимірювання зміщення рухомої частини платформи, що калібрується, використовували еталонний лазерний інтерферометр Renishaw XL-80 [The Renishaw ..., 2020], який є власністю ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ». Значення зміщення з цього пристрою відображені у вигляді цифрових значень на вікні програмного коду, що працював з даними лазера (рис. 4).

Лазерні вимірювання зміщення рухомої частини платформи у вертикальному чи горизонтальному напрямку проводились у двох точках рухомої частини платформи для визначення значень нелінійності рухомої частини платформи в різних точках, що були розташовані по діагоналях рухомої частини платформи на максимальній відстані між ними. Після накопичення достатньої кількості записів необхідних даних проводилась статистична обробка отриманих результатів зміщень по різних точках як для усунення значних відхилень даних, так і для оцінювання їх якості. Після сумісної обробки даних з еталонного лазерного інтерферометра Renishaw XL-80 та даних з інфрачервоного вимірювача зміщення рухомої частини платформи при використанні статистичної обробки з усередненням для отримання якісних результатів були розраховані коефіцієнти для перерахунків вольтів з інфрачервоного давача зміщення в мікрометри (табл. 1, 2).

Середнє значення нового коефіцієнта перерахунку вольтів у мікрометри для горизонтального напрямку руху платформи — 228,242157 мкм/В. Старе значення — 203,356667 мкм/В.



а



б

Рис. 4. Розміщення еталонного лазерного інтерферометра Renishaw XL-80 поруч з платформою, що калібрується, для вимірювання вертикального зміщення рухомої частини платформи (а). Запис рухомої частини платформи з лазерного інтерферометра Renishaw XL-80 синусоїдальні форми, яка рухалась вертикально під впливом зовнішнього сигналу з генератора синусоїдального сигналу (б).

Fig. 4. The Renishaw XL-80 etalon laser interferometer is location side by side to platform which to be calibrated for the vertical displacement of the platform moving part measurement (a). The sinusoidal shape record of the platform moving part by means of the Renishaw XL-80 laser interferometer, which moved vertically by means of an external signal from the sinusoidal generator (b).

Т а б л и ц я 1 . Значення коефіцієнта перерахунку вольтів у мікрометри за різних значень усереднення при горизонтальному русі платформи

Значення усереднення	Коефіцієнт перерахунку, мкм/В	Коефіцієнт кореляції <i>K</i>
<i>У точці «Один»</i>		
150	230,957763	0,99991
350	230,962962	0,99991
950	230,969783	0,99991
Середнє	230,963503	—
<i>У точці «Два»</i>		
150	225,513213	0,99995
350	225,599515	0,99995
950	225,449706	0,99995
Середнє	225,520811	—

Середнє значення нового коефіцієнта перерахунку вольтів у мікрометри для вертикального напрямку руху платформи — 230,884037 мкм/В. Старе значення — 178,868508 мкм/В.

Корисним методом оцінювання стану якості результатів розрахункових процесів за визначенням нових коефіцієнтів перерахунку вольтів в мікрометри для вертикального

Т а б л и ц я 2 . Значення коефіцієнта перерахунку вольтів у мікрометри за різних значень усереднення при вертикальному русі платформи

Значення усереднення	Коефіцієнт перерахунку мкм/В	Коефіцієнт кореляції <i>K</i>
<i>У точці «Один»</i>		
150	226,116396	0,99662
350	226,024472	0,99662
950	225,915949	0,99662
Середнє	226,018939	—
<i>У точці «Два»</i>		
150	235,681264	0,99868
350	235,761244	0,99869
950	235,804898	0,99869
Середнє	235,749135	—

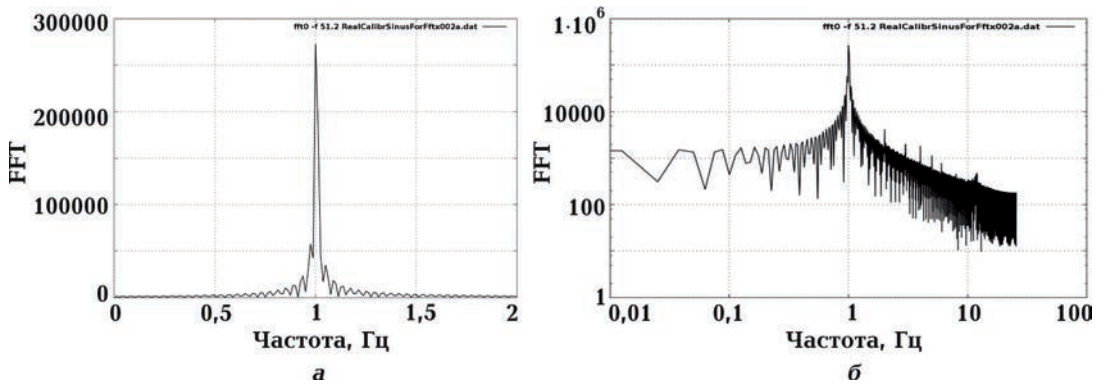


Рис. 5. Спектральне перетворення синусоїдального сигналу з частотою 1 Гц у лінійному (а) та логарифмічному форматах (б).

Fig. 5. Spectral conversion of a sinusoidal signal with a 1 Hz frequency in linear (a) and logarithmic formats (b).

та горизонтального напрямків руху платформи є визначення відносної різниці нового та старого розрахунків для горизонтального та вертикального коефіцієнтів:

- відносна різниця нового розрахунку цих коефіцієнтів в абсолютному значенні — 1,157490, у відсотках — 1,15.
- відносна різниця старого розрахунку цих коефіцієнтів в абсолютному значенні — 13,690592, у відсотках — 13,69.

Бачимо, що при проведенні порівняльного аналізу точності обробки результатів вимірювання найвищу якість мають саме останні результати, отримані завдяки використанню даних еталонного лазерного інтерферометра Renishaw XL-80, розрахованих за допомогою статистичних методів обробки результатів.

Наступним етапом метрологічного оцінювання властивостей калібрувального пристрою було встановлення рівня якості його властивостей при роботі в частотному діапазоні вимірювань. Для цього знову використовували генераторний сигнал синусоїдальної форми, за даними якого потім розраховували перетворення Фур'є для переведення даних з часової області в частотну. На рис. 5 показано значення синусоїдального сигналу в частотній області при значенні базової частоти 1 Гц. Використання логарифмічного формату для перетворення Фур'є синусоїдального сигналу виявилось корисним, тому що при та-

кому форматі стало можливим виявити наявність гармонік справа від основної частоти (див. рис. 5, б).

На рис. 5, а наявність гармонік побачити майже неможливо. Розрахунки коефіцієнтів гармонік, що показують відношення отриманого значення вищих гармонік до отриманого значення першої гармоніки, або наявність коефіцієнтів спотворення синусоїдального сигналу, що були виявлені при використанні спектрального перетворення синусоїдального сигналу, наведено в табл. 3.

Наступним важливим етапом з метроло-

Т а б л и ц я 3 . Коефіцієнти гармонік для синусоїдального сигналу від 1 до 101 Гц

Частота, Гц	Коефіцієнт K_g
1,0049	0,093336684
1,99019	0,0783295901
4,03922	0,0990814357
7,92	0,1059636134
16,00	0,0244386431
31,4166	0,0488998974
63,00	0,046224097
100,25	0,0361499509

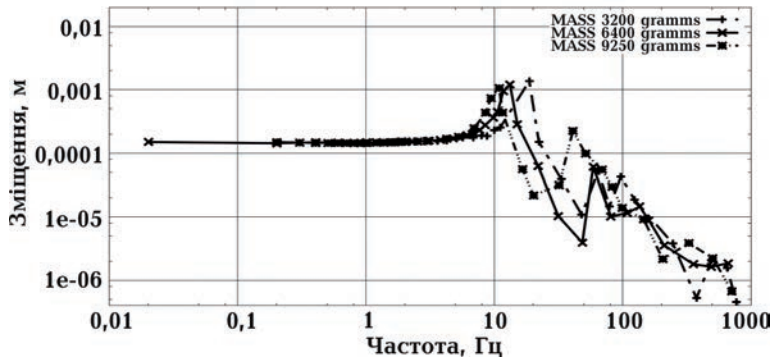


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика рухомої частини калібрувальної платформи в області вимірювання зміщення при значеннях маси навантаження 3200, 6400 та 9250 г.

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the calibration platform moving part in the displacement measurement field for mass values 3200, 6400 and 9250 grams.

гічної сертифікації в частотному діапазоні було вивчення власної частотної характеристики калібрувальної платформи в областях зміщення, швидкості та прискорення. Проводилось навантаження рухомої частини платформи від 3200 до 9250 г. Діапазон частот — від 0,02 до 712 Гц.

Як бачимо на рис. 6, платформа має власний резонанс в діапазоні частот від 10 до 20 Гц, ці значення змінюються залежно від маси пристрою, що був встановлений на рухому частину платформи. Для виявлення властивостей платформи корисним методом є перевірка можливостей її робо-

ти і в інших сферах вимірювань — швидкості і прискорення (рис. 7).

Використання калібрувальної платформи. Після вивчення та проведення експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей калібрувальної платформи і приведення необхідних даних цих результатів до належної документальної форми було отримано можливість замовити метрологічний сертифікат на цей пристрій у відділі вимірювань параметрів руху та віброакустичних вимірювань ДП «УКР-МЕТРТЕСТСТАНДАРТ» (рис. 8).

Отримання такого свідоцтва на пристрій

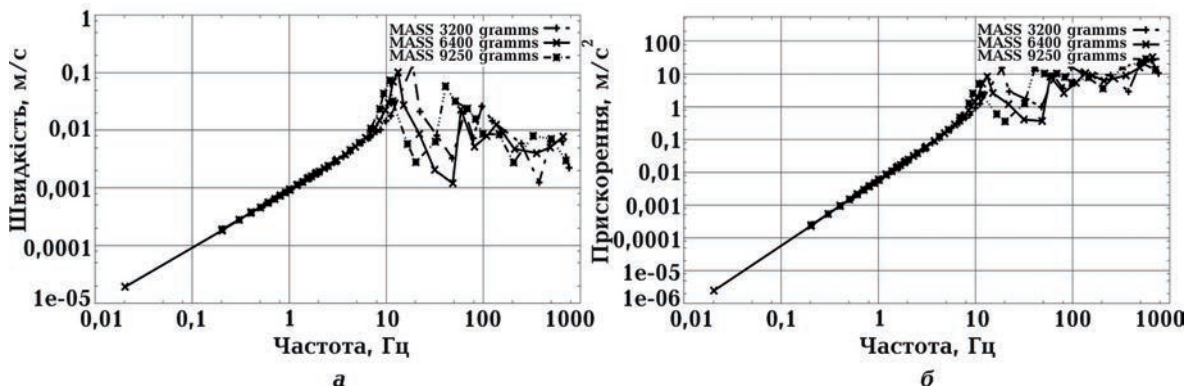


Рис. 7. Залежність амплітуди швидкості (а) та прискорення (б) руху платформи від частоти в діапазоні від 0,02 до 712 Гц.

Fig. 7. Dependence of the speed amplitude (a) and acceleration (б) of the platform movement from the frequency in the range 0.02—712 Hz.

СВІДОЦТВО ПРО КАЛІБРУВАННЯ
Calibration Certificate

Реєстраційний №: <i>Reference number:</i>	UA/22/190730/001058	Дата калібрування: <i>Date of calibration:</i>	30.07.2019 р.
Об'єкт калібрування: <i>Object:</i>	Пристрій для калібрування сейсмодавачів		
Виробник: <i>Manufacturer:</i>	Інститут Геофізики НАН України ім. С.І. Субботіна, Україна 03680, Київ, пр. Паладіна, 32		
Тип: <i>Type:</i>	КІ-011		
Заводський/серійний номер: <i>Serial number:</i>	01		
Назва та адреса замовника: <i>The name and address of the customer:</i>	Інститут Геофізики НАН України ім. С.І. Субботіна		
Місце проведення калібрування: <i>Location where the calibration was carried out:</i>	ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», відділ № 22		
Кількість сторінок свідоцтва: <i>Number of pages of the certificate:</i>	5		
Директор інституту № 2 <i>Director of institute:</i>		О.М. Самойленко <i>Ініціали, прізвище/initials, surname:</i>	
			
Начальник відділу № 22 <i>Head of department:</i>		А.П. Івашенко <i>Ініціали, прізвище/initials, surname:</i>	

Рис. 8. Копія свідоцтва на пристрій для калібрування сейсмодавачів, реєстраційний № UA/22/190730/001058.

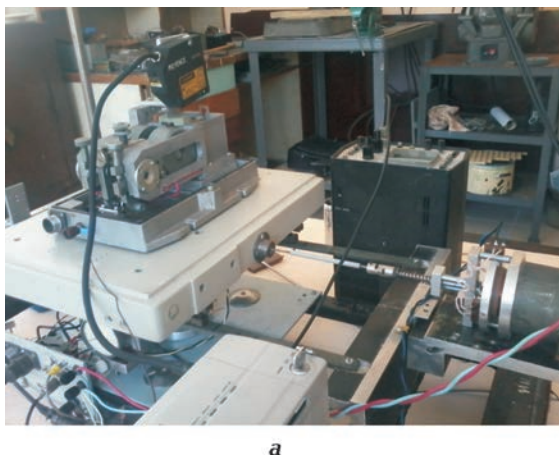
Fig. 8. The certificate copy for device of seismometers calibration, registration № UA/22/190730/001058.

для калібрування сейсмодавачів підвищує рівень довіри до результатів роботи пристрою. Завдяки цим важливим досягненням були проведені роботи з вивчення амплітудно-частотних характеристик різних пристроїв — лазерного сейсмометра, що вимірює зміщення, класичних велосимет-

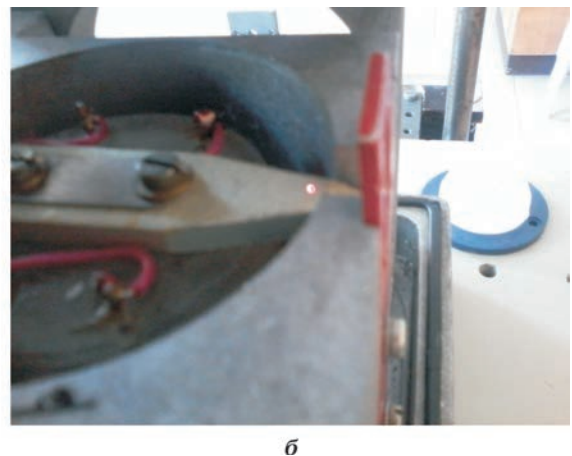
рів ВЕГК і СМЗ, а також чотирьох акселерометрів різного виробництва та призначених для різних цілей — як для пошуку нафти та газу, так і для фіксації вибухів у кар'єрах.

Результати роботи з вивчення амплітудно-частотних характеристик комплексного маятникового пристрою СМЗ представлені на рис. 10, де можна побачити, як відображається залежність значення амплітуди вхідного стандартного сигналу на досліджуваному пристрої від частоти.

На рис. 10 показано амплітудно-частотні характеристики реєстраторів зміщення і швидкості, отримані при подачі вхідного сигналу на комплексний лазерний сейсмометр для вимірювання зміщення та швидкості (рис. 9, б). Лінійність поведінки та стабільність амплітуди вихідного електричного сигналу періодичної форми типу «синус» на рухому частину платформи не залежать від частоти генератора. Завдяки таким стаціонарним властивостям електромагнітного процесу, що йде з генератора сигналів спеціальної форми, амплітуда зміщення рухомої частини платформи теж не залежить від частоти. На рис. 10 можна також побачити, що, незважаючи на ста-



а



б

Рис. 9. Калібрування лазерного сейсмометра та сейсмометра СМЗ, які працюють синхронно на основі використання одного маятника (а). Пляма від променя лазера, що відбивається від маятника та потрапляє в приймач лазерного пристрою Keyonce LK021 (б).

Fig. 9. Calibration of laser seismometer and CM3 seismometer which synchronously works on based use of the same pendulum (a). Laser beam spot which the reflected from the pendulum and enters to the Keyonce LK021 laser device receiver (b).

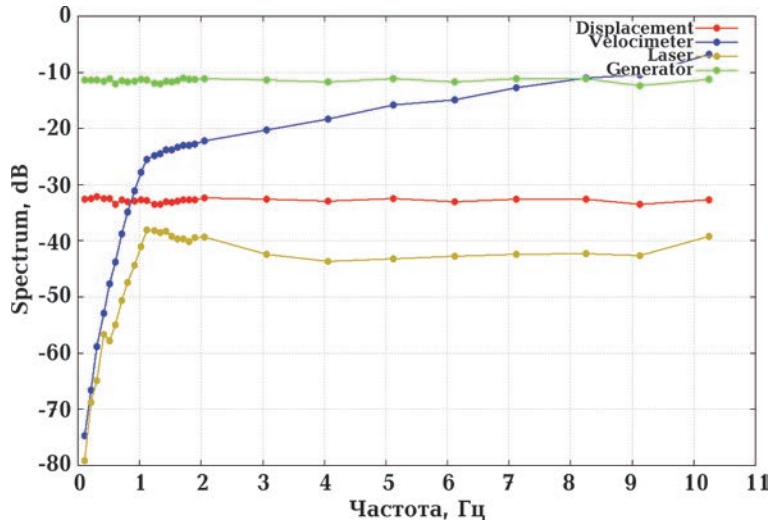


Рис. 10. Відображення реакцій механічного вібраційного пристрою з вимірюваннями зміщення та швидкості та діапазонів статичності вхідного сигналу.

Fig. 10. Display of a mechanical vibrating device reaction for displacement and speed measurements and ranges of the input signal static character.

більність амплітуди вхідного сигналу з рухомої частини платформи на комплексний сейсмометр, маятник якого видає значення зміщення та швидкості одночасно за різних частот, амплітуда його коливань відносно швидкості залежить від них, а відносно зміщення ця залежність відсутня. Це пов'язано з тим, що швидкість та прискорення є похідними першого та другого порядків від зміщення відповідно і тому їх значення пропорційні різним значенням циклічної частоти. Для швидкості це має форму лінійної залежності від частоти, для прискорення — квадратичну. Ці явища лінійної та нелінійної форм сигналів потребують усвідомленого вибору системи вимірювань з метою отримання необхідних результатів для розв'язання різних задач.

Розглянемо просту проблемну ситуацію, яка досить часто виникає під час вимірювань. Припустимо, що формула сигналу зміщення має таку форму періодичного сигналу

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де A — амплітуда сигналу; ω — циклічна частота; φ — фаза цього періодичного сигналу. Тоді похідна першого порядку

періодичного сигналу матиме такий вигляд:

$$v(t) = A\omega \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

тобто швидкість дорівнює похідній від зміщення:

$$v(t) = d \frac{x(t)}{dt}.$$

Аналогічною є операція для розрахунку прискорення:

$$a(t) = d \frac{v(t)}{dt} = d^2 \frac{x(t)}{dt}.$$

Тоді формула прискорення матиме вигляд

$$a(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

Розглянемо залежність значень зміщення (1), швидкості (2) та прискорення (3) від частоти шляхом використання трьох різних значень циклічної частоти ω різного порядку — 0,1; 1,0 та 10,0 Гц одночасно, тому що це є важливим варіантом напряму аналізу окремих компонент записів вхідного сигналу з різними значеннями частот вхідного сигналу. Це відображається формулою, що описує форму їх суми (4):

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) + A \sin(\omega_1 t + \varphi) + A \sin(\omega_2 t + \varphi), \quad (4)$$

де циклічні частоти ω_i мають три значення: 0,1; 1,0 та 10,0 Гц відповідно. При переході в область вимірювань прискорення використовуємо формулу, що є сумою трьох значень прискорення з різними частотами:

$$a(t) = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi) - A\omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \varphi) - A\omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \varphi). \quad (5)$$

Бачимо, що амплітуда є в протифазі зі зміщенням в області часу і амплітуда цього сигналу пропорційна квадрату циклічної частоти ω , помноженому на амплітуду вхідного сигналу. Залежність прискорення від квадрату циклічної частоти ω має суттєвий вплив на можливості отримання необхідних результатів. На рис. 11 показано два розрахункові результати за формулами (5) та (4) відповідно.

Отже, сумарні значення мають суттєво різну форму для двох варіантів вимірювань — зміщення та прискорення. Комплексні вимірювання за допомогою використання різних пристроїв для вимірювань зміщення, швидкості або прискорення можуть дати якісні та необхідні результати, якщо систему вимірювань обирають оптималь-

ною, тобто для довготривалих та низько-частотних процесів (деформацій, нахилів, змін кутів) оптимально обирати комплекси для вимірювань зміщення. Для проведення вимірювань мікросейсмічних явищ у шахтах [Щербина та ін., 2015; Здециц та ін., 2015], що пов'язані з мікротріском в зонах видобування руди, оптимальним варіантом вибору пристроїв є саме вибір велосиметрів або акселерометрів.

Після проведення досліджень стосовно вибору системи вимірювань на основі використання математичних моделей доцільно проаналізувати реальні результати, отримані за допомогою сучасної лазерної технології в рамках проекту «Інформаційні технології на основі лазерних пристроїв для оцінювання сейсмічної небезпеки» (<http://seismo.kiev.ua/Envir/environmentEU.html>) Українського національно-технічного центру (УНТЦ). На рис. 12 показано результати вимірювань мікросейсмічного шуму пристроєм з лазерними вимірювачами зміщення та швидкості, що працювали синхронно. Значення прискорення отримані на основі використання числового диференціювання запису швидкості.

Для усунення проблем з *нелінійністю* в часовій області вимірювань та значними статистичними відхиленнями вхідних і вихідних сигналів процесу калібрування, що

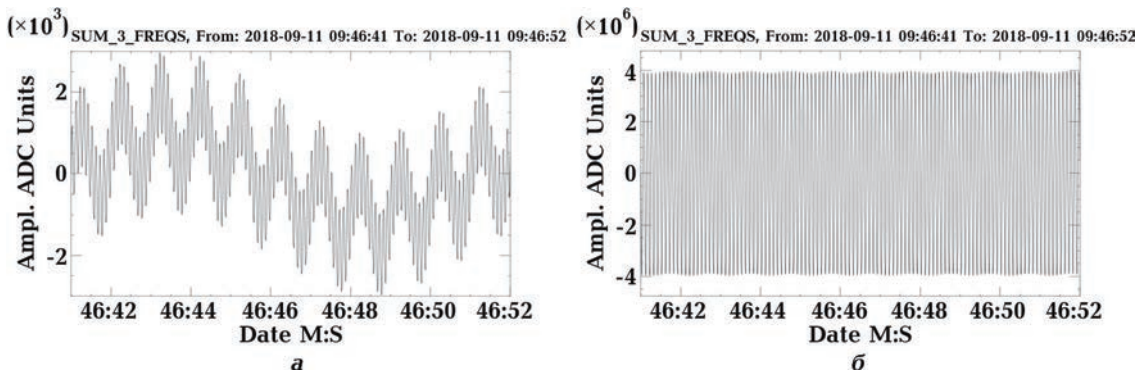


Рис. 11. Сумарний запис зміщення складної періодичної форми, скомпонований з трьох сигналів синусоїдальної форми з частотами 0,1; 1,0 та 10,0 Гц за 11 с: *a* — за формулою (5), *б* — за формулою (4).

Fig. 11. The total record of the complex periodic displacement which composed from three sinusoidal signals with frequencies 0.1, 1.0 and 10.0 Hz in a time 11 seconds: *a* — by formula (5), *b* — by formula (4).

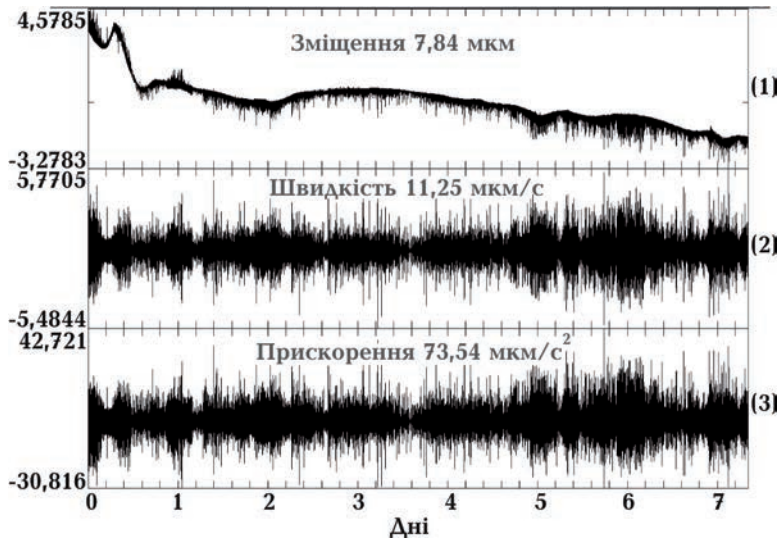


Рис. 12. Використання комплексних вимірювальних систем — зміщення (лазер 1), швидкості (2) та розрахованого чиселовим методом прискорення (3) за експериментально отриманими значеннями зміщення та швидкості. Показано максимальні значення мікросейсмічного транспортного шуму та деформації в одиницях вимірювань зміщення, швидкості та прискорення.

Fig. 12. The use of complex measuring systems — displacement (laser 1), velocity (2) and acceleration by the numerical method calculated (3) in terms of the experimentally obtained values of displacement and velocity. The maximum values of microseismic transport noise and deformation in units of displacement, velocity and acceleration are shown.

неминуче з'являються за впливу нестабільного навколишнього середовища (транспортний шум, сильний вітер, різка зміна температури та ін. [Мишаткин, Захарченко, 2020]) на калібрувальний пристрій в точці його розташування, оптимальним методом запобігання є перехід з часової області вимірювань (див. рис. 2) в частотну [Aoyama, 2008; Larsonnier et al., 2014; Петров та ін., 2015; Wielandt, 2020].

Завдяки проведенню робіт з калібрування класичного горизонтального пристрою ВЕГІК у частотній області [Wielandt, 2020] вдалось прибрати статистично неконтрольовані порушення форм вхідного та вихідного сигналів, що виникають саме в часовій області (див. рис. 2). На рис. 13 показано результат вивчення властивостей горизонтального сейсмометра ВЕГІК [Щербина та ін., 2019а] в частотній області з використанням формату сигналів відгуків цього пристрою на вхідний сигнал у формі нормованих децибелів.

Частотний робочий діапазон прокаліброваного горизонтального сейсмометра ВЕГІК має оптимальний робочий діапазон

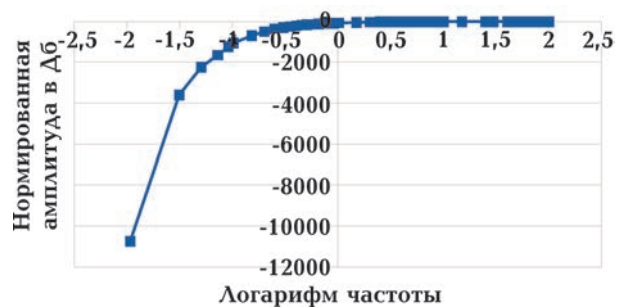


Рис. 13. Результат експериментального процесу калібрування горизонтального сейсмометра ВЕГІК у діапазоні частот від 0,01 до 100 Гц без урахування амплітуд вхідного сигналу та його вихідного сигналу в частотній області.

Fig. 13. The result of the experimental process of horizontal seismometer VEGIK calibration in the frequency range 0.01—100 Hz without taking into account the input signal amplitudes and his output signal in the frequency domain.

Т а б л и ц я 4 . Значення коефіцієнтів чутливості сейсмометрів СМЗ та ВЕГІК по кожному каналу зі статистичними значеннями похибок вимірювань

Тип та модель пристрою	Коефіцієнт, мкм/(с · В)	Коефіцієнт, м/(с · В)	Коефіцієнт, В/(м/с)	Статистична помилка коефіцієнта, В/(м/с)
Сейсмометр СМЗ горизонтальний EW	131,9781541191	0,0001319781	7582,2580942069	5,79306588E-06
Сейсмометр СМЗ горизонтальний NS	122,04245089	0,0001220425	8231,28339906	1,3642E-11
Сейсмометр СМЗ вертикальний Z	163,9352	0,0001639352	6117,03778	- 2,2016856E-5
Сейсмометр ВЕГІК горизонтальний EW	127,14437299	0,0001380869	7358,58895026	2,6343E-07
Сейсмометр ВЕГІК горизонтальний NS	140,3793535	0,0001403794	7123,554675	1,79965E-5
Сейсмометр ВЕГІК вертикальний Z	199,569500	0,0001995695	5083,414579	6,945872E-09

частот від 0,1 до 100 Гц. Після знаходження форми та параметрів передавальної функції в частотному діапазоні доцільно визначити чутливість або значення спеціальних коефіцієнтів перетворень вольтів або одиниць АЦП в значення метр за секунду для досліджуваних пристроїв, що

вимірюють швидкість. Так, за допомогою використання сертифікованого калібрувального пристрою (див. рис. 8, 9, а) отримано значення коефіцієнтів для сейсмометрів різних типів, що забезпечують проведення перерахунків одиниць АЦП у значення метр за секунду (табл. 4, 5).

Т а б л и ц я 5 . Значення коефіцієнтів для проведення перерахунків значень одиниць АЦП у швидкість для сейсмометрів СМЗ та ВЕГІК по кожному каналу

Тип та модель пристрою	Коефіцієнт, мкм/с/ADC	Коефіцієнт, мм/с/ADC	Коефіцієнт, см/с/ADC	Коефіцієнт, м/с/ADC
Сейсмометр СМЗ горизонтальний EW	0,0001573302	1,573301841E-7	1,573301841E-08	1,5733018E-10
Сейсмометр СМЗ горизонтальний NS	0,0001454859	1,4548594E-7	1,4548594E-8	1,4548594E-10
Сейсмометр СМЗ вертикальний Z	0,000195426	1,95426018E-07	1,9542601837E-08	1,9542602E-10
Сейсмометр ВЕГІК горизонтальний EW	0,0001587943	1,58794816E-07	1,587948E-08	1,5879482E-10
Сейсмометр ВЕГІК горизонтальний NS	0,0001673452	1,6734523E-07	1,67345E-08	1,673452E-10
Сейсмометр ВЕГІК вертикальний Z	0,0002379054	2,379654E-07	2,379054E-08	2,379654E-16

Попередній аналіз отриманих результатів оцінки значень метрологічних параметрів класичних сейсмометрів ВЕГІК та СМЗ, таких як чутливість (В/(м/с)) та коефіцієнти для перерахунків одиниць АЦП в фізичний параметр швидкість (м/(с/ADC)), показав, що канали всіх цих модифікованих пристроїв перевищують класичні міжнародні значення таких сейсмометрів, як GURALP [Güralp ..., 2019] та STS-2 [Larsonnier et al., 2014] у 5–6 разів [Щербина та ін., 2015].

Висновки. Використання метрологічно перевіреного (оціненого), сертифікованого (сертифікат № UA/22/190730/001058) і запатентованого калібрувального пристрою дає змогу отримати декілька важливих науково-технічних і метрологічних результатів:

– технічно та метрологічно оцінювати стан та чутливість сейсмологічних та сейсмометричних комплексів — реєстраторів зміщення, швидкості або прискорення;

– визначати амплітудно-частотні характеристики реєстраторів зміщення, швидкості або прискорення для підключення цих пристроїв до міжнародних програмних комплексів автоматичної обробки сейсмічних подій; наприклад, широко відомий ав-

томатизований комплекс автоматичної обробки сейсмічних подій SeisComP3 [About SeisComP3 ..., 2020] потребує використання калібрувальних параметрів сейсмометрів у спеціальній формі, що побудована на використанні сучасного формату XML [SeisComP3 ..., 2020];

– наявність спеціальних програмних модулів сучасного безкоштовного програмного забезпечення GSL дає змогу перераховувати отримані результати на калібрувальному пристрої (див. рис. 1, 4) у стандартні параметри у формах нулів та полюсів [Transfer ..., 2020]; це використовують у багатьох методах автоматичної обробки сейсмічних записів для повернення їх з перетворених у реальні;

– аналіз результатів проведення процесів калібрування пристроїв різного типу в часовій та частотних областях показав (див. рис. 2, б), що частотна область проведення цих процесів є оптимальнішою, тому що в ній відсутній істотний вплив зовнішнього випадкового шуму, оскільки цей процес будується на розрахунках відношень спектральних значень характеристик на різних частотах частотного діапазону калібрування [Wielandt, 2020].

Список літератури

Здешиц В.М., Калініченко О.А., Пігулевський П.Г., Рибалко Б.І., Щербина С.В. Дослідження мікросейсмічних явищ техногенного походження. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 132—142. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111153>.

Мироненко П.С., Павловський О.М. Стенд для перевірки працездатності низькочастотних інерціальних модулів. *Вісник КПІ. Сер. приладобудування, теорія та практика навігаційних приладів і систем.* 2018. Вип. 56(2). С. 5—10.

Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З. Проблема сертификации сейсмических станций. 2020. Режим доступа: <https://docplayer.ru/53847945-Udk-problema-sertifikacii-seismicheskikh-stanciy-mishatkin-v-n-zaharchenko-n-z.html>.

Палій О.М., Мироненко П.С. Пристрій контролю характеристик сейсмічних реєстраторів. *XII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15—16 травня 2019 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського.* Київ, 2019. С. 35—37.

Петров В., Бріцький О., Олещук Е., Фещенко А., Щербина С. Метрологічний контроль геофізичного обладнання України. *Метрологія та прилади.* 2015. № 1. С. 47—56.

Щербина С.В., Пігулевський П.Г., Рибалко Б.І., Здешиц В.М. Дослідження мікросейсмічних явищ у шахті «Артем-1» ШУ ПАТ «Арселор-Міттал». *3-я Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств МГК»: Збірник*

- наукових праць. Кривий Ріг, 2015. С. 100—101. <http://roentgenium.guralp.com/documents/MAN-040-0001.pdf>.
- Щербина С.В., Фещенко А.І., Владимирський О.А., Криворучко І.П., Іващенко А.П., Адаменко О.В. Сертифікована автоматизована цифрова система оцінки стану безпеки різних об'єктів. *Моделювання та інформаційні технології: Збірник наукових праць*. Київ: Вид. Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, 2019б. Вип. 86. С. 36—41.
- Щербина С.В., Фещенко А.І., Лісовий Ю.В. Лазерний калібрувальний пристрій. Патент на корисну модель № UA137134U. Опубл. 10.10.2019. Бюл. № 19. 2019а.
- Щербина С.В., Фещенко А.І., Панков Ф.Н., Кеңдзера А.В., Лесовой Ю.В. Устройство для калибровки сейсмометров. Патент на полезную модель № 77339. Опубл. 11.02.2013.
- Aoyama, H. (2008). Simplified test on tilt response of Cmg40t seismometers. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 53, 35—46 (in Japanese).
- Güralp 40T. Operator's Guide. Document No: MAN-040-0001. Issue F. (2019). Retrieved from <http://roentgenium.guralp.com/documents/MAN-040-0001.pdf>.
- Wielandt, E. (2020). Seismic Sensors and their Calibration. Retrieved from <https://streckeisen.swiss/assets/downloads/seismic-sensors-and-their-calibration.pdf>.
- Larsonnier, F., Nief, G., Dupont, P., & Millier, P. (2014). Seismometers calibration: comparison between a relative electrical method and a vibration exciter based absolute method. *IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences 3 to 5 February, 2014, Cape Town, Republic of South Africa* (pp. 1—4).
- SeisComp3. Imports inventory information from various sources. (2020). Retrieved from https://www.seiscomp.de/seiscomp3/doc/seattle/2012.279/apps/import_inv.html.
- The Renishaw XL-80 laser interferometer. (2020). Retrieved from <https://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system-8268>.
- Transfer function — Pole & Zero. GSL — GNU Scientific Library. (2020). Retrieved from <https://lists.gnu.org/archive/html/help-gsl/2016-11/msg00001.html>.

Complex approach to certification and metrological estimation the state of digital seismometric registrators

S.V. Shcherbyna¹, A.I. Feshchenko¹, Yu.V. Lisovyi¹, O.P. Ivashchenko², O.V. Adamenko², Yu.P. Soroka³, 2021

¹S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²GD «UKRMETRTESTSTANDART», Kiev, Ukraine

³«Roden», Kiev, Ukraine

The modern stage of the latest metrological achievements is being intensively developed in our country in new methodological directions that are based on new scientific and technical achievements. The using of metrologically certified devices of different types and with different metrological parameters increases the level of confidence in the results of these works, because the relative comparison of the results of these works allows potential customers to choose the most useful and effective method for obtaining the desired results. This article presents the results of joint scientific and technical works for the methodology of certification of the calibration developed and patented device and the results of using an already certified calibration device for metrological determination of accelerometer parameters, measurers displacements and velocities. This article also shows that one of the important areas of such work on the metrology of measuring devices

in the area of seismology is also to determine the amplitude-frequency characteristics or amplitude-frequency and phase characteristics of different devices for measurement velocity, acceleration or displacement for the using of these devices in modern automated complex systems for determination of various parameters of seismic events such as regional, local and teleseismic.

The article also presents comparative analyzes of experimental results of work on determining the frequency characteristics of the calibration device in different areas of measurements — displacement, velocity and acceleration. Obtaining these important results for assessing the state of various other seismological devices allowed experimentally do it for possible determination the presence of different types of physical differences in the regions of the same frequency range for displacement's and velocity's measurers. Compliance of the certificate with the requirements of the international metrological certification system ISO/IEC17025, obtained for the calibration device had been ensured by SE «UKRMETRTESTSTANDART».

Key words: metrology, calibration, seismometry, accelerometers, laser, displacement, velocity, acceleration.

References

- Zdeshits, V.M., Kalinichenko, O.A., Pigulevskiy, P.G., Ribalko, B.I., Shcherbina, S.V. (2015). Investigation of micro-seismic phenomena of anthropogenic origin. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(5), 132—142. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111153> (in Ukrainian).
- Mironenko, P.S., & Pavlovsky, O.M. (2018). Stand for checking the efficiency of low-frequency inertial modules. *Visnyk KPI. Ser. pryladobudovannya, teoriya ta praktyka navihatsiynykh pry-ladiv i system*, 56, 5—10 (in Ukrainian).
- Mishatkin, V.N., & Zakharchenko, N.Z. (2020). The problem of certification of seismic stations. Retrieved from <https://docplayer.ru/53847945-Udk-problema-sertifikacii-seysmicheskikh-stanciy-mishatkin-v-n-zaharchenko-n-z.html> (in Russian).
- Paliy, O.M., & Mironenko, P.S. (2019). Device for monitoring the characteristics of seismic recorders. *XII All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists «Look into the future of instrument making»*, May 15—16, 2019, Kyiv (pp. 35—37) (in Ukrainian).
- Petrov, V., Britsky, O., Oleschuk, E., Feshchenko, A., & Shcherbina, S. (2015). Metrological control of geophysical equipment of Ukraine. *Metrolohiya ta prylady*, (1), 47—56 (in Ukrainian).
- Shcherbina, S.V., Pigulevskiy, P.G., Ribalko, B.I., & Zdeshits, V.M. (2015). Investigation of microseismic phenomena in the mine «Artem-1» SHU PJSC «Arcelor-Mittal». *Collection of scientific works based on the results of the 3rd International scientific and technical conference «Modern technologies of ore development. Ecological and economic consequences of MGC enterprises»* (pp. 100—101). Kryvyi Rih (in Ukrainian).
- Shcherbina, S.V., Feshenko, A.I., Vladimirs-ky, O.A., Krivoruchko, I.P., Ivashchenko, A.P., & Adamenko, O.V. (2019b). Certified automated digital system. security assessments of various facilities. Collection of scientific works «Modeling and information technology» (is. 86, pp. 36—41). Kyiv: Institute of Modeling Problems in Energy named after G.Ye. Pukhov (in Ukrainian).
- Shcherbina, S.V., Feshenko, A.I., & Lisoviy, Iu.V. (2019a). Laser calibration device. Utility model patent № UA137134U. Publication of information 10.10.2019. Bull. No 19 (in Ukrainian).
- Shcherbina S.V., Feshenko A.I., Pankov F.N., Kendera A.V., Lisoviy Iu.V. (2013). Device for calibration of seismometers. Utility model patent № 77339. Publication of information 11.02.2013.
- Aoyama, H. (2008). Simplified test on tilt response of Cmg40t seismometers. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 53, 35—46 (in Japanese).
- Güralp 40T. Operator's Guide. Document No:

- MAN-040-0001. Issue F. (2019). Retrieved from <http://roentgenium.guralp.com/documents/MAN-040-0001.pdf>.
- Wielandt, E. (2020). Seismic Sensors and their Calibration. Retrieved from <https://streckeisen.swiss/assets/downloads/seismic-sensors-and-their-calibration.pdf>.
- Larsonnier, F., Nief, G., Dupont, P., & Millier, P. (2014). Seismometers calibration: comparison between a relative electrical method and a vibration exciter based absolute method. *IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences 3 to 5 February, 2014, Cape Town, Republic of South Africa* (pp. 1—4).
- SeisComp3. Imports inventory information from various sources. (2020). Retrieved from https://www.seiscomp.de/seiscomp3/doc/seattle/2012.279/apps/import_inv.html.
- The Renishaw XL-80 laser interferometer. (2020). Retrieved from <https://www.renishaw.com/en/xl-80-laser-system-8268>.
- Transfer function — Pole & Zero. GSL — GNU Scientific Library. (2020). Retrieved from <https://lists.gnu.org/archive/html/help-gsl/2016-11/msg00001.html>.

Комплексный подход к сертификации и метрологической оценке современных цифровых сейсмометрических регистраторов

С.В. Щербина¹, А.И. Фещенко¹, Ю.В. Лесовой¹, А.П. Иващенко²,
О.В. Адаменко², Ю.П. Сорока³, 2021

¹Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

²ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ», Киев, Украина

³ТОВ «Роден», Киев, Украина

Метрологические исследования (поверки, измерения), основанные на различных научных и технических достижениях именно в области метрологии, интенсивно развиваются в различных методологических направлениях как во всем мире, так и в Украине. Использование метрологически сертифицированных устройств различного типа и с разными физическими параметрами повышает уровень доверия к результатам работ. Именно поэтому относительное сравнение полученных результатов позволяет потенциальным заказчикам сертификатов выбирать эффективную для них методику проведения работ для получения корректных данных. Приведены результаты совместной научно-технической работы по разработке методологии проведения процедуры сертификации калибровочного устройства, а также результаты использования уже сертифицированного калибровочного устройства метрологических определений параметров акселерометров, велосиметров и регистраторов смещения. Одним из важных направлений проведения работ по метрологии измерительных устройств в сфере сейсмологии является определение амплитудно-частотных характеристик или амплитудно-частотных и фазовых характеристик различных типов регистраторов (смещение, скорости или ускорения). Использование этих устройств в современных автоматизированных комплексных системах обеспечивает определение различных параметров сейсмических событий как локальных или региональных, так и телесеismicического.

Представлены результаты сравнительных анализов экспериментальных работ по определению частотных характеристик калибровочного устройства, полученных в различных сферах измерений, — смещение, скорость и ускорение. Полученная оценка состояния различных сейсмологических регистраторов позволяет экспериментально определить разного типа физические различия в одном из диапазонов частот для регистраторов смещения и скорости. Соответствие полученного сертификата на калибровочное устройство требованиям международной метрологической системы сертификации ISO/IEC 17025 обеспечено ГП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ».

Ключевые слова: метрология, калибровка, сейсмометрия, акселерометры, лазер, смещение, скорость, ускорение.