

УДК 550.34.035

МЕТРОЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЬ ГЕОФІЗИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ УКРАЇНИ

В. Петров, академік НАН України, директор,

О. Бріцький, кандидат технічних наук, доцент,

Інститут проблем реєстрації інформації (ІПРІ) НАН України, м. Київ,

Е. Олещук, провідний інженер,

А. Фещенко, провідний інженер,

С. Щербіна, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,

Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАН України, м. Київ

Зростання сучасного міського будівництва на території України, розташованих близько до сейсмічно небезпечних зон Румунії, вимагає проводити достатньо великі обсяги вимірювань рівнів реакцій нових будівель на сейсмічні хвилі великої інтенсивності. Для вирішення цих питань необхідно використовувати метрологічно повірені сейсмометричні прилади, розроблення та метрологічний контроль яких засновані на сучасних лазерних технологіях

Height of modern urban construction on the territory of Ukraine, located close to the seismically dangerous zones Romania needs to spend quite a large amount of measurement levels reactions of new buildings on seismic waves of great intensity. To solve these problems we must use attorneys seismological metrological instruments, development and metrological control are based on modern laser technologies

Ключові слова: геофізичні прилади, сейсмометри, калібрування, повірка, сейсмічна небезпека, землетруси, лазери, нанометрія.

Keywords: geophysical instruments, seismometers, calibration, verification, seismic hazard, earthquakes, lasers, nanometrics.

Система сейсмологічних спостережень будь-якої країни, розташованої на тектонічно активній території або поблизу від неї, повинна мати достатню кількість сейсмометричних або сейсмологічних приладів та інформаційних систем, які можуть забезпечити роботу усіх необхідних для цього комплексів збирання та аналізування сейсмологічної інформації. Україна достатньо близько розташована до сучасної сейсмічно-тектонічної активної геологічної структури — зони Вранча, що міститься в Румунії (рис. 1).

Небезпечні сейсмічні події цього регіону можуть достатньо інтенсивно впливати на стан будівель, розташованих у південних (Крим, Одеса) та західних районах (Карпати, Закарпаття) нашої країни [1, 2, 3]. Для забезпечення високої якості результатів будівельного процесу за цих складних геолого-тектонічних умов необхідно проводити дослідження рівня коливань поверхні землі сейсмометричним повіреним обладнанням, що відповідає державним метрологічним нормам і вимогам для таких обладнань.

На сьогодні в національній мережі сейсмічних спостережень України використовується значна кількість призначених для цього геофізичних приладів. Вони зосереджені в інженерно-сейсмометричній мережі Мінрегіонбуду України, сейсмологічній службі НАН України, геофізичній службі Мінтопенерго України. Загальним проблемним питанням у використанні геофізичних приладів є відсутність їх метрологічного забезпечення, що значною мірою збільшує сейсмічні ризики.

Для отримання і вивчення результатів вимірень метрологічних параметрів сейсмометричних пристроїв повинні використовуватися якісні калібрувальні та повірочні віброплатформи. Разом з тим добре відомо, що основна проблемність питання цього метрологічного забезпечення геофізичних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) зумовлена відсутністю в Україні атестованих широкосмугових прецизійних віброплатформ, які є основним елементом ідентифікації таких параметрів і характеристик

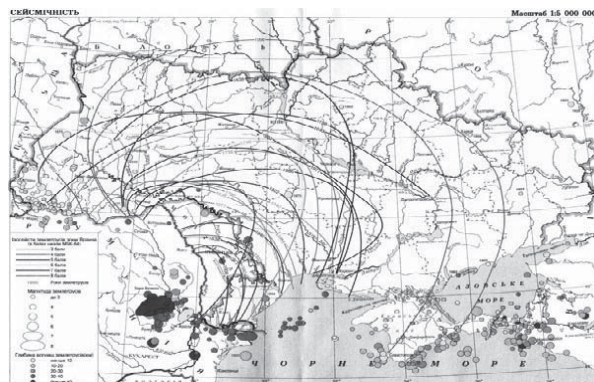


Рис. 1. Мапа сейсмічної небезпеки України, що використовується за вирішення питань щодо будівництва споруд у сейсмонебезпечних районах
Fig. 1. Map Ukraine of seismic hazard used for building structures in earthquake-prone areas

геофізичних ЗВТ, як чутливість, лінійність, частотні характеристики, нулі й полюси передаткових функцій. Відомі вітчизняні та закордонні віброплатформи [4—9] не можуть використовуватися повністю у потрібних напрямках сейсмологічної метрології через відсутність офіційних документів проходження ними Державної метрологічної атестації.

Для вирішення цих питань в нашій країні вже багато років проводяться роботи щодо створення та використання калібрувальних пристроїв власного розроблення, які б могли забезпечити виконання всіх робіт, необхідних для досліджень властивостей сейсмометрів, всіх каналів сейсмічних станцій, інших геофізичних ЗВТ. Тому є необхідність проаналізувати сучасний стан метрологічного забезпечення геофізичних ЗВТ в Україні та визначити перспективні напрямки його удосконалення.

ПЕРВИННІ МОДЕЛІ КАЛІБРУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Дослідження сейсмічних коливань будь-якої природи або походження та інтенсивності вимагають використовувати для їх реєстрації відповідну апаратуру, яка дозволяє отримувати необхідну інформацію стосовно різноманітних властивостей цих сейсмічних записів. Як відомо, наразі основною формою сейсмічних записів є цифрова форма, отримувана за допомогою АЦП — аналогово-цифрових перетворювачів, що розміщуються у сейсмостанціях або поруч з ними.

Вони можуть мати різні параметри, базовими з яких є їхня розрядність. У таблиці 1 представлені можливі варіанти розрядності — від мінімального до максимального значення. Діапазони розрядності АЦП визначаються властивостями напрямів досліджень, у яких вони повинні використовуватися оптимальним способом.

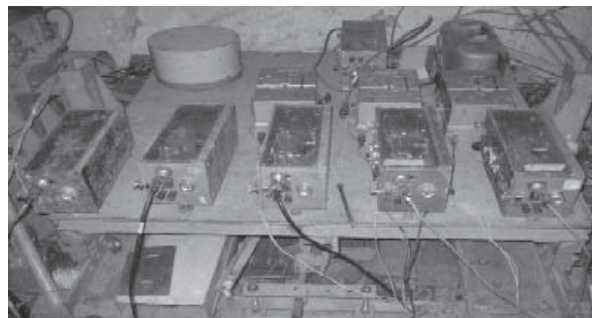


Рис. 2. Первинний калібрувальний пристрій ІГ НАНУ для тестування сейсмометричних приладів — їх механічного стану та змін магнітних та електронних параметрів.
Fig. 2. Initial calibration device IG NASU seismometers test — their mechanical condition and changes of magnetic and electronic parameters

Аналіз табличних значень параметрів АЦП показує, що оптимальним за мінімальним значенням для використання у сейсмології повинен бути не менше, ніж 16-розрядний АЦП, який вже дозволяє реєструвати землетруси з магнітудою, не більшою, ніж 4,5. Максимальним значенням бітів АЦП може бути число 32, яке може забезпечити реєстрацію землетрусів з магнітудою понад 9.0 і вище, що трапляються достатньо рідко (раз на 250 — 300 років), але ж які є максимальними за енергією реалізації тектонічних процесів. Для вивчення й уточнення метрологічних параметрів систем реєстрації сейсмічних подій повинна використовуватися метрологічно повірена апаратура.

Останнім часом в ІГ НАНУ розроблено декілька цифрових сейсмічних станцій, які мають АЦП з розрядністю 24 біта. [5,11,12] Основна частина цих сучасних станцій власного українського розроблення проходила тест на спеціальному калібрувальному пристрої (рис. 2), що має достатньо обмежені можливості за власними технічними параметрами. Основним його недоліком є відсутність у нього можливості калібрувати вертикальні сейсмометри, які у процесах первинного калібрування доводилося перекладати на бік. Відсутність механічного приводу

Таблиця 1.

Table 1.

| Біти АЦП | Динамічний діапазон | Децибелі, dB | Максимальна магнітуда |
|----------|---------------------|--------------|-----------------------|
| 8 | 256/2 | 42 | 2 |
| 12 | 4096/2 | 66 | 3 |
| 16 | 65536/2 | 90 | 4.5 |
| 20 | 1048576/2 | 114 | 6 |
| 24 | 16777216/2 | 138 | 7 |

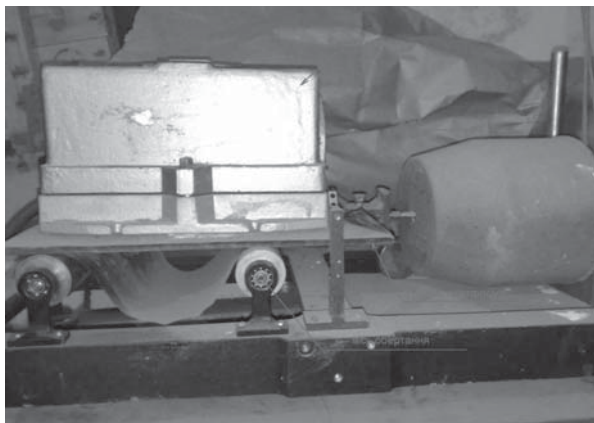


Рис. 3. Макет калібрувального пристрою
Карпатського відділення ІГ НАНУ
Fig. 3. Model of calibration device in Carpathian
Department IG NASU

з різними формами руху не дозволяла перевіряти сейсмометри за допомогою вхідних сигналів на сейсмометри у періодичних або імпульсних формах.

Для розвитку процесу калібрування в Україні у Карпатському відділі ІГ НАНУ розроблено макет іншого калібрувального пристрою для калібрування горизонтальних складових сейсмометрів (рис. 3). Принцип калібрування полягає в приведенні до руху скляної платформи за допомогою електричного генератора, під'єданого до магніта. Платформа міститься на металевих циліндрах, осі яких перебувають у середині підшипників і є рухомими. На одній осі є дзеркальце, яке відбиває промінь нерухомого лазера на лінійку (рис. 4). За рахунок збільшення плеча променя до лінійки задається коефіцієнт механічного підсилення амплітуди коливання зайчика на лінійці. Маючи амплітуду коливання зайчика і довжини плечей, обчислюється амплітуда коливання платформи.

Практично визначити характеристики за допомогою платформи можна лише в межах до 0,5 Гц, оскільки на високих частотах виникають паразитні резонанси. На низьких частотах сильно знижується відношення сигнал/шум за рахунок нерівномірності зчеплення з рухомою платформою.

Платформа не відтворює строго заданого синусоїдального зміщення. Додатково виникають кутові коливання, які сумуються зі сейсмічним сигналом. Катастрофічні наслідки похибки є для горизонтальних компонентів, де похибка на низьких частотах доходить до квадрата частоти коливань платформи, оскільки горизонтальні сейсмометри чутливі до нахилу.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що спосіб не є точним, і його взагалі не можна застосувати

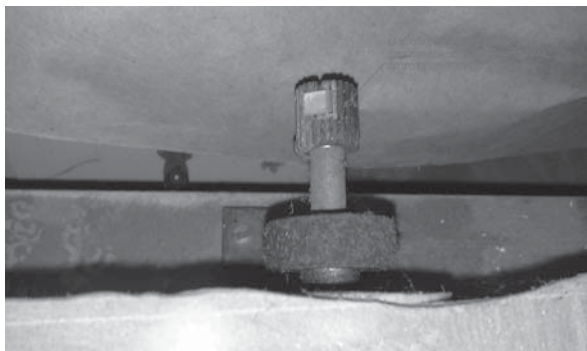


Рис. 4. Лазерний вимірювач зміщень віброплатформи
розроблення відділу сейсмічності
Карпатського регіону

Fig. 4. The laser displacement meter of vibration
platform made by seismic department
of Carpathian region

для широкосмугових сейсмометрів, але сумісно з використанням ПАЗ генератора можна перевірити точність визначення амплітуди коливань.

Класична теорія перехідних функцій маятника з електродинамічною котушкою вперше описана графом Б. Поліциним [14] у 1914 році. Вона дозволяє визначити коливання ґрунту, якщо відомі генераторна константа котушки G , власна резонансна частота коливань маятника ω_0 , коефіцієнт демпфування (загасання) на виході h і маса маятника m .

Перехідні функції сейсмометра пов'язують відносні зміщення (швидкості, прискорення) маси маятника до зміщення (швидкості, прискорення) ґрунту. Ці залежності детально описані у [18]. Розв'язок диференціальних рівнянь механічного маятника згідно з [15, 18] і перетворення Лапласа [17] дають перехідні функції сейсмічного приймача.

Перехідна функція для відтворення швидкості ґрунту в комплексному виді, де $s = j \cdot \omega$, $j = \sqrt{-1}$, а ω — кругова частота, має вид:

$$H_V(s) = -\frac{G_e \cdot s^2}{s^2 + \omega_0^2 + 2 \cdot h \cdot \omega_0 \cdot s} = \frac{D_V(s)}{s},$$

де ω_0 — резонансна частота коливань маятника,

h — коефіцієнт демпфування (загасання) на виході,

G_e — зовнішня ефективна генераторна константа:

$$G_e = \frac{G \cdot R_e}{R_e + R_c} = \frac{G R_e}{R_T},$$

де R_e [Ом] — зовнішній опір навантаження,

R_c [Ом] — внутрішній опір котушки,

$R_e + R_c = R_T$ — загальний опір джерела напруги.

Для прискорення

$$B_V(s) = \frac{D_V(s)}{s^2}.$$

Для сигналів, вищих від резонансної частоти маятника, велосиметр мірятиме швидкість з лінійною амплітудною частотною характеристикою. Звідси походить його назва.

Зареєстровані сигнали мають розмірність одиниць АЦП. Цифрова форма запису дозволяє за допомогою обчислення перейти до істинного виду коливання ґрунту під станцією. Для цього необхідно мати частотні характеристики реєструвальних каналів. З метою їх визначення розроблено методу калібрування, яка полягає у використанні запису відгуку реєструвального тракту на калібрувальний імпульс.

Останній фізично є максимальним наближенням до математичного імпульсу $\delta(t)$ Дірака з безмежною амплітудою і нульовою тривалістю (Oppenheim & Willsky, 1983) [18]. Згідно з визначеннями перетворень Лапласа і Фур'є обидва перетворюють імпульс Дірака у спектр, що містить усі частоти з однаковою амплітудою. Завдяки цій властивості відгук на калібрувальний імпульс вимірювальної системи пропорційний частотній характеристиці каналу (signal theory, Scherbaum, 1996) [17]. Методом половини потужності зі спектра відгуку програмно визначаються f_0 і h :

$$\frac{1}{2}|H|^2 \Rightarrow \left\{ \frac{h}{f_0} \right\}, h = \frac{f_U - f_L}{2 \cdot f_0} \text{ і } f_U \cdot f_L = f_0^2;$$

$$|B| \approx \frac{f_0}{2 \cdot h} \text{ для частот } \frac{f_0}{2 \cdot h} \approx f_L < f < f_U \approx f_0 \cdot 2 \cdot h,$$

де: f_L, f_U — верхня і нижня частоти рівня 3 дБ ($1/\sqrt{2}$) за зрізом,

f_0 — резонансна частота вільних коливань маятника,

B — ширина смуги пропускання половини потужності.

Аналітично виконується розрахунок генераторної константи G за чутливості одиниці молодшого розряду каналу S_k за алгоритмом:

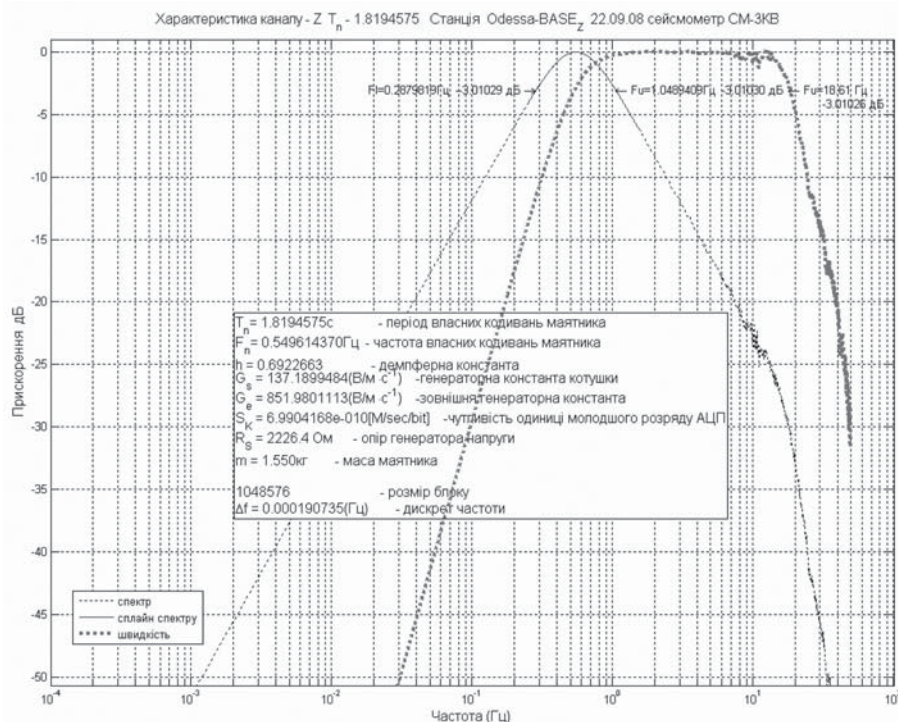


Рис. 5. Частотна характеристика каналу Z з підсилювачем, визначена за допомогою відгуку на калібрувальний імпульс та програми ПАЗ

Fig. 5 Frequency response of the amplifier channel Z determined with using an impulse response to a calibration and PAZ program

$$\frac{1}{2}|H|^2 \Rightarrow \left\{ \frac{h}{f_0} \right\} \Rightarrow \Rightarrow \left\{ \frac{h - h_0}{m, R_T, f_0, h} \Rightarrow G \quad f_0, g \rightarrow \ell_p \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G, \ell_p \rightarrow S_{body},$$

де: f_0 — резонансна частота маятника,
 h — коефіцієнт загасання,
 ℓ_p — приведена довжина маятника.

Рис. 5 демонструє частотну характеристику сейсмометра ВЕГІК, що використовується для польових вимірювань під час дослідження заданого майдану, частота дискретизації 100 Гц, фільтр нижніх частот 5-го порядку з частотою зрізу 20 Гц, щоб уникнути дзеркального ефекту на частоті Найквіста. Додатково контролер має цифровий ФІР фільтр нижніх частот 9-го порядку. Внутрішня частота дискретизації цифрового контролера становить 800 Гц за дискретизації даних 100 Гц, за рахунок чого зростає ефективність ФІР фільтра. Програма PAZ-generator автоматично знаходить відгуки і визначає нулі та полюси.

Зразок розрахованих пазів для сейсмометра ВЕГІК: Полюси каналу Z в радіанах ω ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$):

-94.7170888138602
 -76.6277345081349 + 55.6733079448634i
 -76.6277345081349 - 55.6733079448634i
 -29.2691901012042 + 90.0813045209291i
 -29.2691901012042 - 90.0813045209291i
 -6.17220761693597
 -1.58510456725701

$Sn = 1.43468E-9$ [м] $A = 7623277101.9212$

де A — нормувальний коефіцієнт, який нормує функцію передавання до одиниці та стосується перших 5 полюсів контролера з АЦП і сейсмометрів ВЕГІК. Зазначені полюси характеризують низькочастотні антизавадні фільтри контролерів. Останні два полюси є функцією передавання самого механічного маятника сейсмометра з котушкою, де Sn — чутливість одного біта АЦП для Z каналу (м/с/біт).

На рис. 6 як приклад представлено обчислену нормовану характеристику вимірювального каналу, побудовану за пазами порівняно зі спектром відгуку на калібрувальний імпульс, для швидкості ґрунту. На графіку є незначні розбіжності зумовлені присутністю в записах, окрім сигналу, зумовленого калібрувальним імпульсом, ще і сигналу, зумовленого коливаннями ґрунту під сейсмометром.

Проведено безліч експериментів з програмою ПАЗ-генератор, розраховано істинні коливання ґрунту за різних сейсмометрів, які завжди порівнювалися з еталонним сейсмометром GURALP CMG40TD. Характеристики відрізнялися максимум на (0,1—1,8) %, що є наслідком класу точності ЗВТ,

якими проводилися вимірювання котушок і мас сейсмометрів, які перевірялися, оскільки цифрові розрахунки практично не вносять похибок.

Для вирішення важливих проблем сейсмічної небезпеки в Україні кількість сейсмометричних приладів у сучасному стані будівель на геотектонічно активних територіях нашої країни повинна зростати. Це особливо важливо для тих районів, які розташовані поблизу Румунії, Карпат, Закарпаття, а також Кримського півострова (рис. 1). Для кожного знову розробленого сейсмометра та реєструвального напрямку потрібні спеціальні процедури метрологічного контролю цього обладнання — повірочні та калібрувальні, які встановлюють відповідність пристрою, що вивчається, міжнародним технічним вимогам до сейсмологічних систем вимірювань різного типу.

Для первинної роботи за цим напрямком у відділі сейсмічної небезпеки ІГ НАНУ розроблено калібрувальний пристрій IGAN-02, який запатентовано [13]. Загальну схему цього пристрою подано на рис. 7, а на рис. 8 представлено його реальну експериментальну роботу з одночасного процесу калібрування двох сейсмометричних систем різних конструкцій — власного розроблення DAS04+SL210 та англійського — «Guralp» CMG-40T. Запатентовані технічні властивості цього калібрувального пристрою дозволяють проводити як польові, так і лабораторні роботи з повірки та калібрування датчиків різного типу — п'єзодатчиків, сейсмометрів, вимірників зсувів. Це досягається завдяки тому, що повірка або калібрування сейсмометричного каналу можуть здійснюватися за допомогою імпульсної або періодичної форми вхідного сигналу на досліджуваний датчик.

Для вивчення динамомеханічних властивостей калібрувального пристрою IGAN-02 проведено роботу щодо вимірювання максимальних значень зсуву його платформи у вертикальному та горизонтальному напрямках. Результати цих вимірювань (рис. 9) свідчать, що лінії аналогової

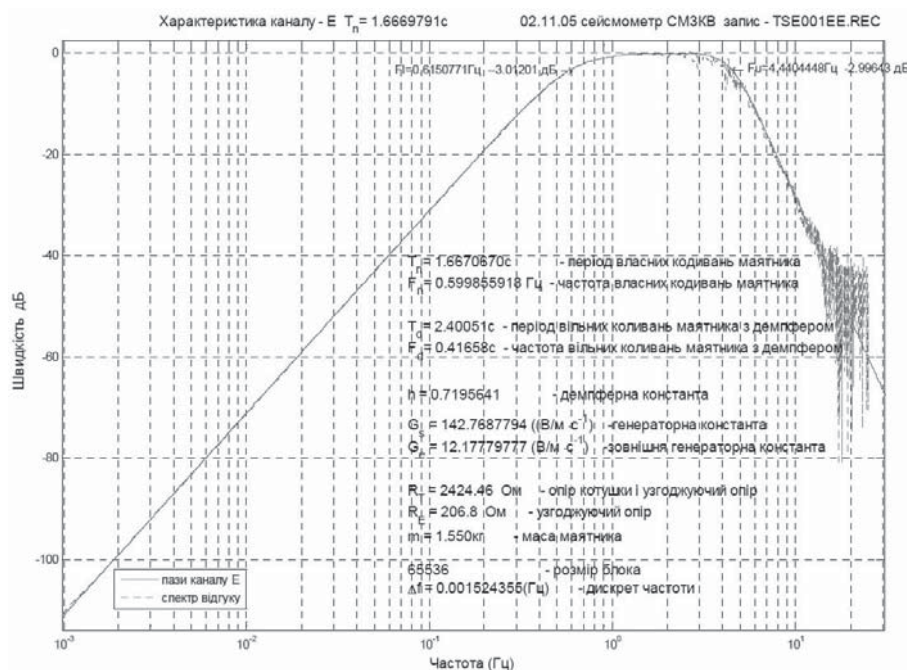


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика EW каналу SM3KB для швидкості

Fig. 6. Frequency response of the EW channel SM3KB for rate

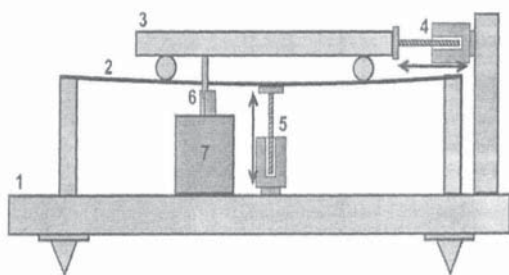


Рис. 7. Схема пристрою для калібрування сейсмометрів IGAN-02:

Fig. 7. Diagram for calibrating of seismometer IGAN-02:

- 1 — нерухома платформа;
- 2 — гнучка пластина; 3 — рухома платформа;
- 4 — електромагнітний привід горизонтальних рухів;
- 5 — електромагнітний привід вертикальних рухів;
- 6 — інфрачервоний датчик реєстрації горизонтальних і вертикальних рухів;
- 7 — електронний блок вимірювання зміщення

та цифрової систем вимірювань горизонтальних (1) та вертикальних (2) зміщень платформи мають достатньо лінійний характер без суттєвих порушень.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СЕЙСМОМЕТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Під час роботи фахівцю на зазначеному вище пристрої доступні візуальні довідкові екрани, на яких динамічно відображаються записи амплітуд вхідного і вихідного сигналів, а також АФЧХ досліджуваних датчиків у виді кумулятивних спектрів і фаз вхідного і вихідного сигналів (рис. 10).

Використання міжнародного високоякісного сертифікованого сейсмометричного приладу «Guralp» CMG40T у процесі тестування і вивчення властивостей калібрувального пристрою власного розроблення дозволило провести порівняльний аналіз абсолютних значень вхідного сигналу і його розрахо-



Рис. 8. Одночасний процес калібрування двох приладів різної моделі для вивчення властивостей сейсмометричних каналів та системи фіксації часу в сейсмічних записах за допомогою GPS-пристроїв різних моделей

Fig. 8. Simultaneous calibration of the two different devices models to study the seismometer channels properties and fix system in time of seismic records using GPS-devices of different models

ваних значень за результатами вимірювань та математичних обчислень, які входять до повного комплексу англійського сейсмометра CMG40T. На рис. 11 подано розраховані значення зміщення (3) та прискорення (1) за вимірюваним значенням швидкості (2).

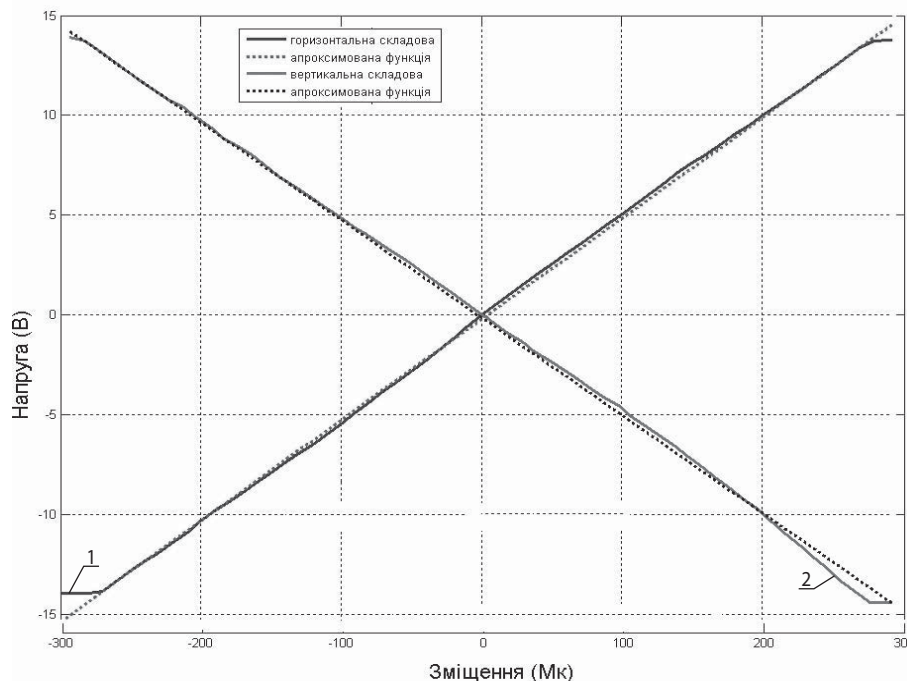


Рис. 9. Діапазони лінійності вихідного сигналу давача вимірювання зміщень залежно від значень зміщень рухомої частини платформи у вольтах за вертикальним або горизонтальним напрямком

Fig. 9. The range of linear output sensor for displacement measuring depending on the values of the moving platform displacement in volts on the vertical or horizontal direction

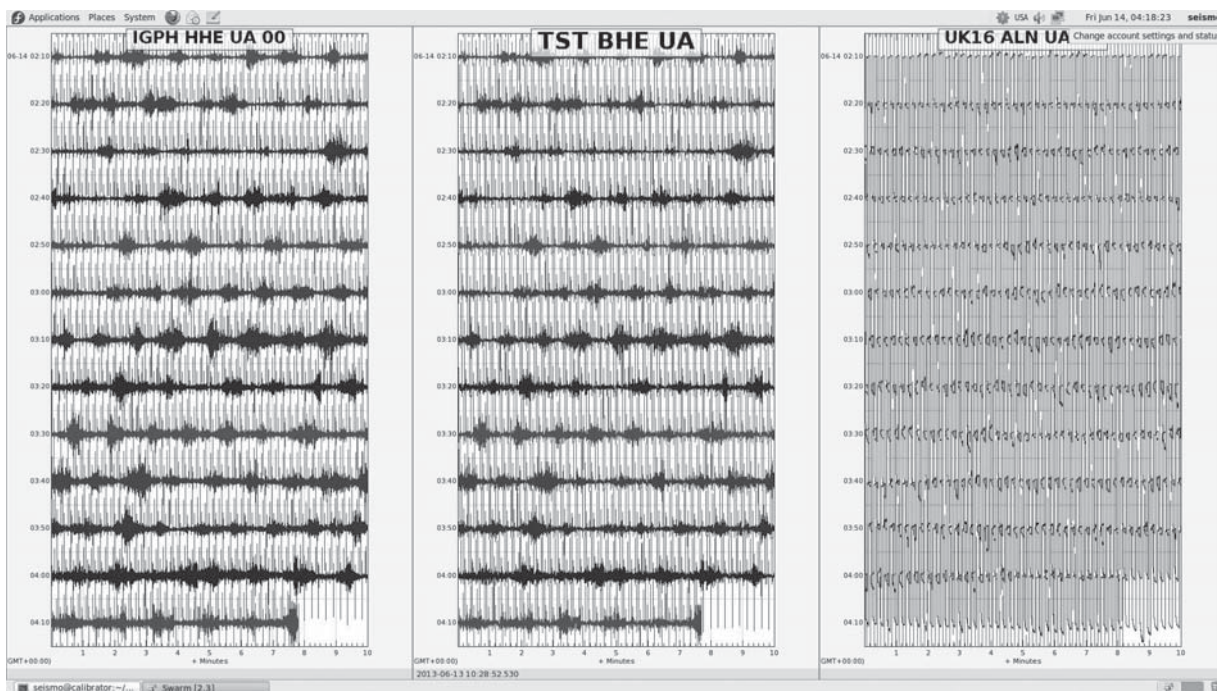


Рис. 10. Однчасне відображення вхідного сигналу прямокутної форми (праворуч) на два сейсмометричні пристрої, розташовані сумісно (рис. 8) на рухомій частині платформи, — «Guralp» CMG40T (ліворуч) і DAS04 з давачем SL210 (посередині)

Fig. 10. Simultaneous display of input rectangular shape (right) on two seismometer devices that are compatible (Fig. 8) for moving the platform — «Guralp» CMG40T (left) and DAS04 with sensor SL210 (middle)

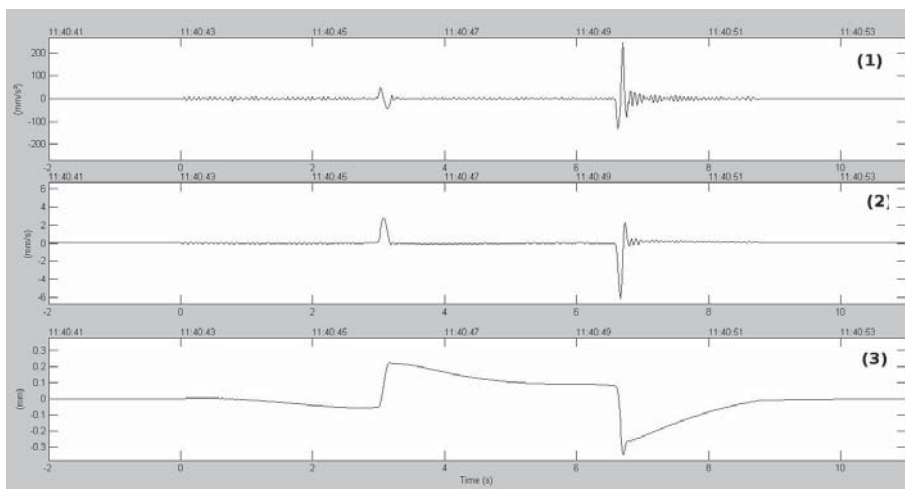


Рис. 11. Графічне відображення відгуків горизонтального каналу NS сейсмометра «Guralp» CMG40T на вхідний сигнал прямокутної форми з амплітудою 200 мікрон

Fig. 11. Graphical display of horizontal channel seismometer NS «Guralp» CMG40T reviews on input rectangular shape with an amplitude of 200 microns

Результати розрахункових значень зміщення та прискорення платформи за калібрування сейсмометричного приладу CMG40T, представлених на рис. 11, отримано за допомогою використання спеціальних математичних обчислювальних процедур, які використовуються для розрахунку АФЧХ сейсмометра. На рис. 12 подано розрахункові гра-

ти більш вищої точності й якості оцінки метрологічних параметрів сейсмометрів.

СУЧАСНА ЛАЗЕРНА ПОВІРКА СЕЙСМОМЕТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Сучасна лазерна метрологічна повірочно-калібрувальна платформа, сумісно розроблена та

фіки АФЧХ горизонтального каналу станції DAS04, до якого підключено класичний сейсмометр SL210, представлений на рис. 8 праворуч на платформі. За результатами експериментальних вимірювань і розрахунків, представлених на рис. 8, видно, що для отримання більш якісних результатів розрахунків за експериментальними даними потрібне попереднє статистичне опрацювання результатів вимірювання, що дозволить досягти

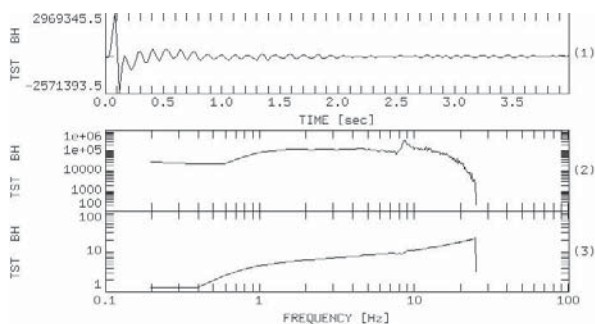


Рис. 12. АФЧХ горизонтального сейсмометра SL210, підключеного до одного з каналів станції DAS04

Fig. 12. AFCHH horizontal seismometer SL210, connected to channel station DAS04

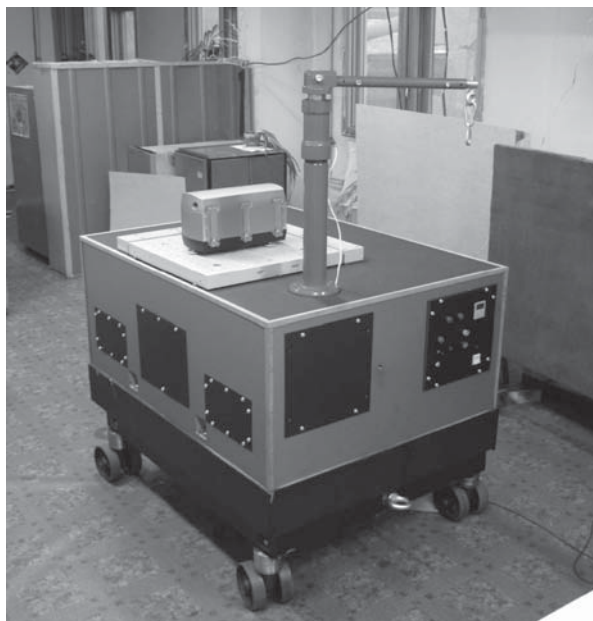


Рис. 13. Загальний вид прецизійної широкопasmової віброплатформи

Fig. 13 General view of precision broadband vibration platform

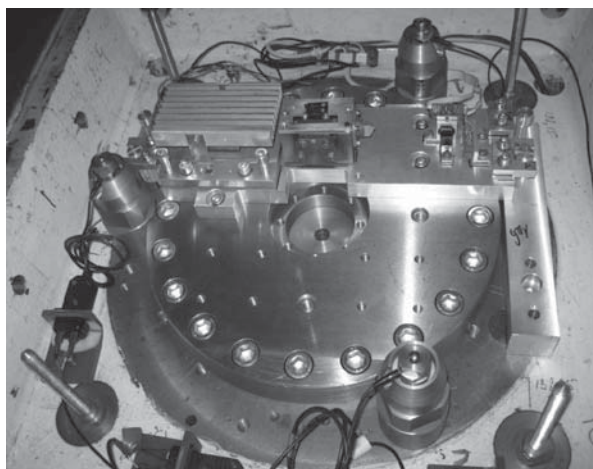


Рис. 14. Елементи кінематичної системи прецизійної широкопasmової віброплатформи за знятої рухомої плити

Fig. 14. Kinematic system of precision broadband vibration platform Elements when removing the moving plate

виготовлена у процесі науково-технічної співпраці між ІГ та ІПРІ НАНУ, дозволяє виконувати контроль стану сейсмометричного обладнання будь-якого типу і виготовленого у будь-якій країні. Це досягається завдяки її неординарним науково-технічним властивостям, пов'язаним із сучасними лазерними розробленнями [19,20].

Прецизійна широкопasmова метрологічна віброплатформа (рис. 13) має вимірювальну систему на основі методів цифрової лазерної інтерферометрії (рис. 14) із приводом її рухомої частини на основі керованих силових п'єзоактуаторів. Окрім того, точність ідентифікації параметрів у цій системі вимірювань значною мірою визначається точністю визначення реального вхідного механічного впливу у діапазоні амплітуд 10 нм ... 100 мкм і діапазоні частот у межах (0,01 ... 100) Гц, що досягається за допомогою розробленої системи автоматичного управління нанопереміщеннями на основі системи нановимірювань та системи їх реєстрації.

Сучасна віброплатформа з лазерним вимірювачем зміщень забезпечує:

- формування вхідних механічних впливів у вертикальній і горизонтальній площині (гармонічних, прямокутних, ступінчатих, імпульсних, випадкових, довільних (аналітично чи таблично заданих) у діапазоні ± 50 мкм; (0,01...100) Гц на геофізичні прилади масою до 100 кг;
- вимірювання з точністю, не гіршою 1 нм, вхідних механічних діянь, їх візуалізацію та цифрове документування;
- реєстрацію реакції геофізичного приладу на вхідне механічне діяння з точністю, не гіршою 1 нм, (обладнаних цифровим лазерним інтерферометром) чи у штатному режимі.

Сумісний аналіз вхідних механічних діянь на геофізичні прилади та їх реакцій дозволяє в автоматичному режимі визначати ступінь лінійності й такі динамічні характеристики: частотні характеристики (амплітудну і фазову), передаткову функцію (нулі та полюси), перехідну функцію.

Як вимірювальну систему використано створений в ІПРІ НАНУ цифровий інтерферометр на основі напівпровідникового лазера. Для опрацювання квадратурних сигналів інтерферометра запропоновано, розроблено і виготовлено цифровий сигнальний процесор, який забезпечує видавання інформації стосовно переміщення плити віброплатформи за каналом Ethernet. Для попереднього метрологічного процесу на цій платформі проведено роботу з генерації синусоїдального сигналу різної частоти

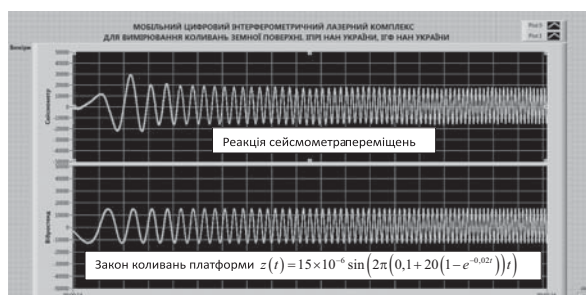
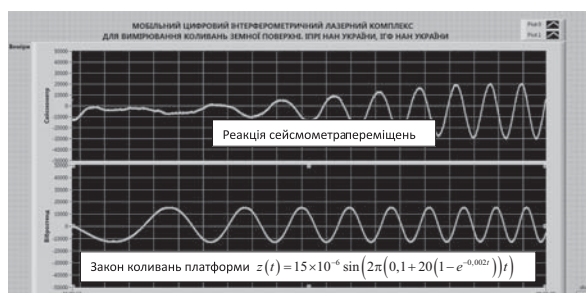
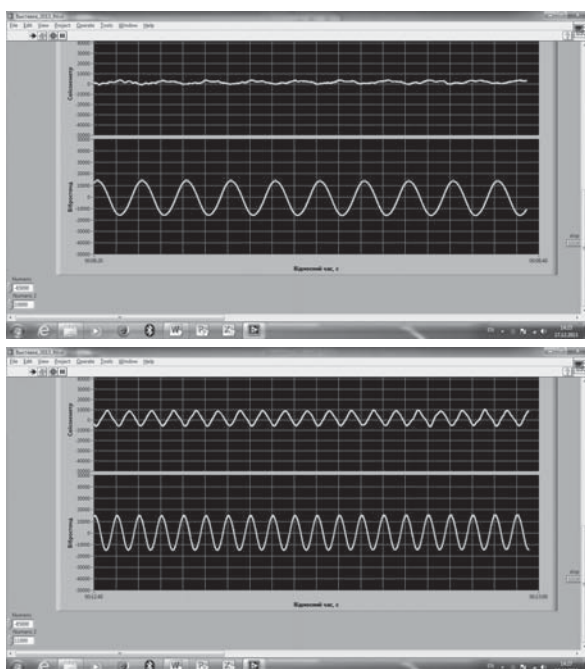


Рис. 15. Записи (верхні) реакцій лазерного сейсмометра на вхідні періодичні сигнали, (нижні) синусоїдальної форми різної частоти

Fig. 15. Entries (upper) of reactions to incoming laser seismometer periodic signals (lower) sinusoidal different frequencies

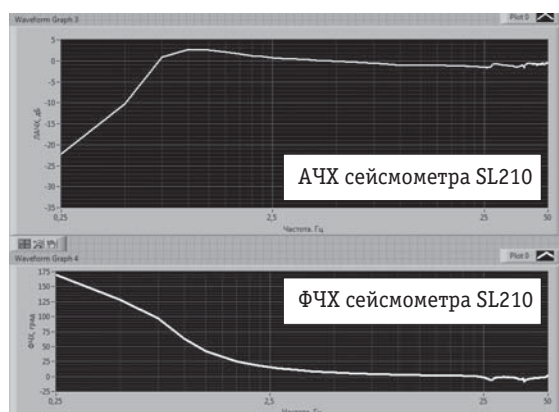


Рис. 16. Приклад автоматичного визначення частотних характеристик сейсмометра із використанням широкоплатформної віброплатформи

Fig. 16. An example of automatically determining of the frequency characteristics of broadband seismometers with using vibration platform

для аналізу реакції на нього, як на періодичний вхідний сигнал лазерного сучасного сейсмометра, розробленого також в ІПРІ НАНУ [21] (рис. 15).

Перший попередній аналіз отриманих результатів калібрувального процесу сучасного лазерного сейсмометра на прецизійній широкоплатформній геофізичній метрологічній віброплатформі дозволив пересвідчитися у тому, що цю систему формування та цифрового інтерферометричного нановимірювання вхідних механічних діянь на досліджувані геофізичні прилади можна використовувати для метрологічної атестації наявних, нових розроблених та придбаних за кордоном сейсмометрів. На рис. 16. наведено приклад визначення частотних характеристик вертикального сейсмометра SL210 із вбудованим цифровим лазерним вимірювачем переміщення.

На сьогодні широкоплатформна віброплатформа на основі цифрової лазерної інтерферометрії пройшла державну метрологічну атестацію (Свідоцтво ДП «Укрметртестстандарт» №22–893 від 18.11.2014) і може використовуватися для перевірки та калібрування сейсмометрів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Ассоциация украинского сейсмостойкого строительства (Association for Ukrainian Earthquake Engineering) (AUUE). http://www.seism.org.ua/seism04-02_r.html.
2. Державні будівельні норми ДБН В.1.1-12:2006 «Будівництво в сейсмічних районах України». // Київ: Міністерство будівництва, архітектури і житлово-комунального господарства України (State Construction
3. Сейсмическое районирование территории СССР. (Методические основы и региональное описание карты 1978 г.) // Отв. ред. В.И. Бунз, Г.П. Горшков —

Standard DBN V.1.1-12: 2006 «Construction in seismic regions of Ukraine.» // Kyiv Ministry of Construction, Architecture and Housing and Communal Services of Ukraine), 2006. — 84 с/р.

Standard DBN V.1.1-12: 2006 «Construction in seismic regions of Ukraine.» // Kyiv Ministry of Construction, Architecture and Housing and Communal Services of Ukraine), 2006. — 84 с/р.

- М.: Наука (Seismic zoning of the USSR. (Methodical bases and regional map description 1978) // Ed. Ed. V.I. Bune, G.P. Gorshkov — М.: Nauka), 1980. — 308 с/р.
4. Стенд для испытаний и калибровки сейсмометрической аппаратуры // Г.Н. Бугаевский, В.П. Белов, С.Д. Нестеренко // Строительство и техногенная безопасность. Сб.науч.тр, вып.5. Симферополь, КАПКС (Stand for testing and calibration equipment seismometric // G.N. Bugaevskiy, V.P. Belov, S.D. Nesterenko // Construction and technological safety. Sb.nauch.tr, Issue 5. Simferopol, KAPKS). — 2001. — С/Р. 92—97.
 5. В.А. Королев, А.М. Складар, П.Т. Тонких, С.В. Щербина. Цифровые сейсмические станции для инженерно-сейсмологических исследований: оснащение, калибровка, полевые испытания // Сейсмологический бюллетень за 2006 год. — Севастополь (V.A. Korolev, A.M. Sklyar, P.T. Tonkih, S.V. Scherbina. Digital seismic stations for engineering and seismological research: equipment, calibration, field tests // Seismological Bulletin for 2006. — Sevastopol). — 2008. — с/р. 104—111.
 6. В.Н. Арапов, А.А. Солошенко. Блок управления стендом для калибровки инженерно-сейсмометрической аппаратуры // Строительство и техногенная безопасность (V.N. Agarov, A.A. Soloshenko. Control unit stand for calibration engineering seismometric // Construction equipment and technological safety). — 2011. — № 35. — С/Р. 152—157.
 7. CT-EW1 Calibration Table for broadband and short-period seismometers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.lennartz-electronic.de.
 8. The CT-EW1 Calibration Table // Document Number: 990-0062. Lennartz electronic GmbH.
 9. Seismometer Calibration System PET-0A&PET-03H for calibration of Seismometers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imv.co.jp/e/products/other/pet/>
 10. В.А. Королёв, П.Т. Тонких. Платформенно-генераторный метод калибровки цифровой сейсмометрической аппаратуры для полевых исследований // Строительство и техногенная безопасность (V.A. Korolev, P.T. Tonkih. Platformer — Generator method calibration of digital seismic instruments for field research // Construction and technological safety). — 2011. — № 35. — С/Р. 150—152.
 11. Щербина С.В. Обзор некоторых цифровых сейсмических регистраторов ИГ НАНУ. // Геофизический журнал (Shcherbina S.V. An overview of some digital seismic recorders IG NASU. // Geophysical Journal). — 2008 — Т/В. 30 — № 2 — С/Р. 83—90.
 12. Щербина С.В. Цифровые сейсмические регистраторы и их калибровка. // Геофизический журнал (Shcherbina S.V. Digital seismic recorders and their calibration. // Geophysical Journal). — 2011 — Т/В 33 — № 2 — С/Р. — 136—160.
 13. Щербина С.В., Фещенко А.И., Панков Ф.Н., Лесовой Ю.В., Кендзера А.В. // Устройство для калибровки сейсмометров. Патент на полезную модель (Shcherbina S.V., Feschenko A.I., Pankow A.N., Lesovoj Y.V., Kendzera A.V. // The device for the calibration of seismometers. Utility model patent) №77339. Киев (Kiev), 2013.
 14. B. Galitzin, «Vorlesungen über Seismometrie», B.G. Teubner, Leipzig and Berlin, 1914.
 15. Erhard Wielandt, «Seismic Sensors and their Calibration. Institute of Geophysics,» University of Stuttgart Richard-Wagner-Strasse 44, D70184 Stuttgart e-mail: ew@geophys.uni-stuttgart.de.
 16. Doetsch G., Anleitung zum praktischen Gebrauch der Laplace Transformation und der Z-Transformation, R. Oldenbourg Verlag, München.
 17. F. Scherbaum, 1996. Of poles and zeros Fundamentals of Digital Seismology. Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik. Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany.
 18. Oppenheim, A. V. & Willsky, A. S., 1983. Signals and Systems. Prentice Hall, New Jersey, USA.
 19. Удосконалення геофізичних приладів на основі цифрової лазерної інтерферометрії / Бріцький О.І. // Реєстрація, зберігання і оброб. даних (Improving geophysical instruments based on laser interferometry digital / OI Britskyy //, Storage & Processing. data). — 2013. — Т/В. 15, № 2 — С/Р. 65—72.
 20. Патент України (Ukraine Patent) 106553, МПК G01R 13/00, G01R 15/00 G01B 9/02 (2006.01). Високошвидкісний інтерферометр на основі запам'ятовуючого пристрою // Петров В.В., Бріцький О.І., Косяк І.В., Цубін О. А., Возненко М.В.; заявник та власник Ін-т проблем реєстрації інформації НАН України (High interferometer-based storage device // V.V. Petrov, Britskyy A.I., shoal I.V., Tsubin O.A., Voznenko M.W.; applicant and owner of The Institute of Information Recording of NAS of Ukraine). — № а 2013 04496, заявл. (appl.) 10.04.2013, опубл. (publ.) 10.09.2014, Бюл. (Bull.) № 17.
 21. Сучасний лазерний сейсмометр (Modern laser seismometer). <http://seismo.kiev.ua/Lasers/lasers.html>

Отримано / received: 2014.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О.М. Величком (Україна).
Prof. O.M. Velychko, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.