

# СЕНСОРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

---

## SENSORS AND INFORMATION SYSTEMS

---

---

PACS 93.85.+q

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142046

### EXPANDING THE BANDWIDTH OF A SEISMIC SENSOR

*V. Zhukovskiy<sup>1</sup>, A. Gokhman<sup>1</sup>, and L. Vilinska<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> South Ukrainian National Pedagogical University, Odessa, 65020, Ukraine

<sup>2</sup>Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 65029, Ukraine

### EXPANDING THE BANDWIDTH OF A SEISMIC SENSOR

*V. Zhukovskiy, A. Gokhman, and L. Vilinska*

**Abstract.** If we reduce technologically the frequency of natural oscillations of the pendulum of a seismic sensor below 1 Hz, then its performance characteristics become unacceptable. It is shown that by adjusting of the transfer function of the seismic sensor by the transfer functions of the typical dynamic units, a horizontal platform can be obtained in the low frequency region of the amplitude-frequency characteristic. An equation of a proportional-integral-differential controller in a discrete form is proposed in which a feedback signal is calculated using the STM32 microcontroller. Application of the modern microcontrollers to generate a feedback signal allows to flexibly adjust the frequency response of a seismic sensor by directly selecting weight factors, as well as making it remotely tuned. Such a solution combined with the proposed optical method of converting mechanical vibrations into electric allows achieving a high degree of miniaturization of the oscillatory system and obtaining a high level of signal-to-noise ratio of the hardware part.

**Keywords:** seismic sensor, transfer function, bandwidth, signal / noise ratio

## РОЗШИРЕННЯ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ СЕЙСМІЧНОГО СЕНСОРА

*В. К. Жуковський, О. Р. Гохман, Л. М. Вілінська*

**Анотація.** Технологічне зниження частоти власних коливань інертної маси сейсмічного сенсора нижче 1 Гц призводить до неприпустимого зниження експлуатаційних якостей приладу. У даній роботі показано, що коректуючи передавальну функцію сейсмічного сенсора передавальними функціями типових динамічних ланок, в низькочастотній області амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) можна отримати горизонтальну ланку. Авторами пропонується рівняння пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора в дискретному вигляді, по якому за допомогою мікроконтролера STM32 розраховується сигнал зворотного зв'язку. Використання сучасних мікроконтролерів для генерації сигналу зворотного зв'язку дозволяє гнучко коригувати АЧХ сейсмічного сенсора за рахунок безпосереднього підбору вагових коефіцієнтів, а також дистанційно його налагоджувати. Таке рішення в поєднанні з запропонованим оптичним способом перетворення механічних коливань в електричні дозволяє домогтися високого ступеню мініатюризації коливальні системи і отримати високий рівень співвідношення сигнал/шум апаратної частини.

**Ключові слова:** сейсмічний сенсор, передавальна функція, смуга пропускання, співвідношення сигнал / шум

## РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО СЕНСОРА

*В. К. Жуковский, А. Р. Гохман, Л. Н. Вилинская*

**Аннотация.** Технологическое снижение частоты собственных колебаний инертной массы сейсмического сенсора ниже 1 Гц приводит к недопустимому снижению эксплуатационных качеств прибора. В данной работе показано, что корректируя передаточную функцию сейсмического сенсора передаточными функциями типовых динамических звеньев, в низкочастотной области амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) можно получить горизонтальную площадку. Авторами предлагается уравнение пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора в дискретном виде, по которому при помощи микроконтроллера STM32 рассчитывается сигнал обратной связи. Использование современных микроконтроллеров для генерации сигнала обратной связи позволяет гибко корректировать АЧХ сейсмического сенсора за счет непосредственного подбора весовых коэффициентов, а также производить его удаленную настройку. Такое решение в сочетании с предложенным оптическим способом преобразования механических колебаний в электрические позволяет добиться высокой степени миниатюризации колебательной системы и получить высокий уровень соотношения сигнал/шум апаратной части.

**Ключевые слова:** сейсмический сенсор, передаточная функция, полоса пропускания, соотношение сигнал / шум

### Introduction

The development of broadband low-frequency seismic sensors is limited by a problem in providing low natural frequency of the moving mass. If the natural frequency is below 1 Hz it is necessary to use a pendulum locking mechanism for moving the device. Additionally the temperature instability in the pendulum positioning increases, the overall mechanical reliability of the seismometer decreases. Presently, natural frequency of 1 Hz is the lower limit value for seismic sensors because its subsequent reduction yields unacceptable reduction in device performance.

The present study is focused on the approaches to expand the seismometer bandwidth, and examines the ways to improve its performance.

### Device Operation Principle

The operation principle of any seismometer from the most ancient to the most modern is similar [1-4]. The main element of the device is a mass pendulum suspended on the bottom part of the device. Ideally, the pendulum should have no mechanical or electromagnetic connections with the housing. However, it is unrealizable in the Earth's gravity conditions. The housing of the seismometer is rigidly connected with the soil, and therefore begins to move due the ground motion, and due to the mass inertia properties the pendulum should not move.

In seismic sensors are often used pendulums with swing center being in rest or delay relative to the earth surface movement. The rest degree of the seismometer swing center characterizes its performance and is determined by the ratio of the ground motions period  $T_G$  to that of the seismometer pendulum natural oscillations  $T_0$ . If  $T_G / T_0 \ll 1$ , the swing center almost does not move and the vibrations are reproduced accurately; if  $T_G / T_0$  is close to 1, the vibrations may be distorted due to resonance; if  $T_G / T_0 \gg 1$ , when the soil moves very slow, the inertia properties are not evident and the swing center moves almost as a single unit with the ground and does not measure the ground motion.

All characteristics of a seismometer can be derived from the equations of motion of its mechanical parts [1]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = -K \frac{d^2\xi}{dt^2}, \quad (1)$$

where  $x$  is the recorded seismogram,  $\xi$  - ground displacement,  $\varepsilon$  - damping constant,  $\omega_0 = 2\pi / T_0$ ,  $T_0$  - the pendulum natural vibrations period,  $K$  - coefficient depending on the structural properties of the seismometer (normal gain).

If the ground motion is a harmonic function  $\xi = \xi_0 \cos \omega t$ , then the solution of equation (1) has the following form:

$$x = \bar{x} + x_0(\omega) \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

where  $\bar{x}$  characterizes the natural vibrations of the pendulum,  $x_0$  - oscillation amplitude in the recording device. It should be noted that parameter  $\bar{x}$  depends on the time and at  $\varepsilon \geq 1$   $\bar{x}$  it tends rapidly to zero and therefore can be neglected in equation (2). The seismometer sensitivity can be characterized by the frequency dependence of the vibration amplitude:

$$x_0(\omega) = \xi_0 \frac{\omega^2 K}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}}. \quad (3)$$

The curve  $x_0(\omega) / \xi_0$  (Fig. 1) is called the amplitude-frequency characteristic (AFC) of the seismometer.

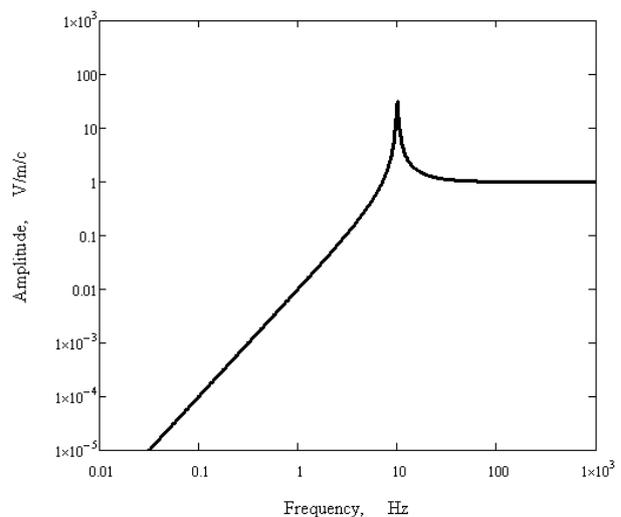


Fig. 1. shows that the seismometer sensitivity decreases exponentially for frequency values below the resonance one.

A universal method to decrease the lower limit of the seismometer transmission is to using a reverse filter [5]. For simplicity reasons control theory can be used. To expand the seismometer bandwidth the transfer function (3) should be adjusted by transfer functions of typical dynamic links [6]:

$x_p(\omega) = P$  - transfer function of the proportional gain,

$x_i(\omega) = I / x_0(\omega)$  - transfer function of the integrator,

$x_d(\omega) = D x_0(\omega)$  - transfer function of the differentiator,

$P, I, D$  - weighting coefficients.

The adjusted transfer function  $X(\omega)$  is:

$$X(\omega) = x_0(\omega) + x_p(\omega) + x_i(\omega) + x_d(\omega). \quad (4)$$

The AFC of the corrected seismometer transfer function is presented in Fig.2 [5].

By changing the coefficients of the typical dynamic links it is possible to obtain the desired transfer function of the seismometer.

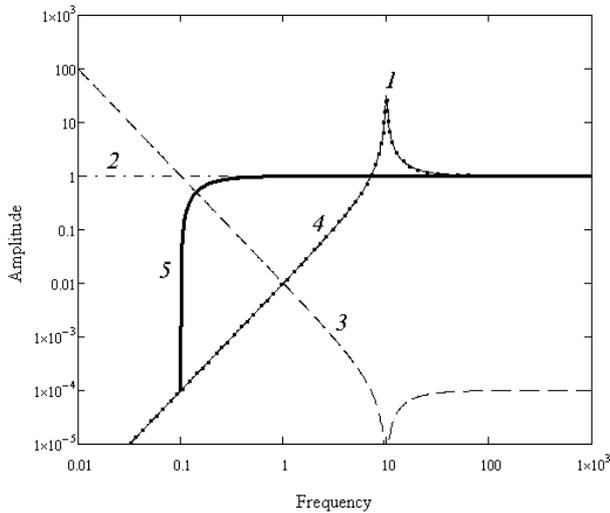


Fig. 2. The AFC 1 – of inertial mass 2 - of proportional gain, 3 - of integrator, 4- of differentiating link (the corresponding line in the figure coincides with 1) 5 - of seismometer.

Fig. 3 is a block diagram of a wideband feedback seismometer, which comprises a proportional, integral and differential regulation unit.

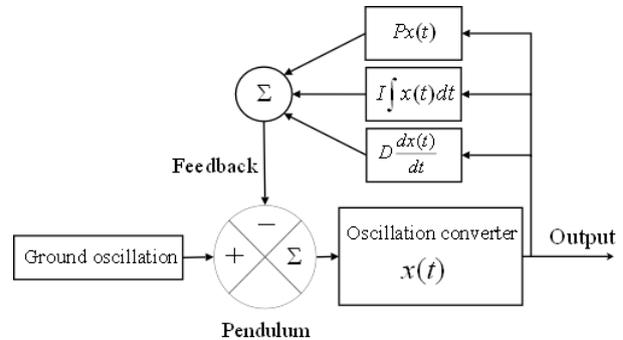


Fig. 3. Block diagram of a broadband seismometer.

A regulator, comprising the above mentioned units is called PID regulator. The feedback control equation in this case takes the following form:

$$U(t) = Px(t) + I \int_0^t x(t) dt + D \frac{dx(t)}{dt}. \quad (5)$$

Parameter  $K$  in equations (1) and (3) could depend on frequency. For example, electromotive force of induction is a function of frequency and goes to zero at low frequencies for converting the electrodynamic method. Therefore for design of low-frequency seismic sensors in the following ways can be used to exclude such effect:

- varying the capacity by changing the distance between the plates;
- varying the coil's inductance by adding a core;
- changing the photocurrent conduction at photodiode illumination.

Note that optical recording method of vibration is most protected from interference. This method has a proven itself in atomic force microscopy. Successful results of using laser interferometric seismic sensors are known [7, 8]. These seismic sensors have high sensitivity and are relatively simple, but their drawback is a laser which has a short lifetime (about 10000 hours) and requires complex temperature stabilization. High power consumption of seismic sensors cause's additional problems in case of autonomous power supply. Converters using

optocouplers (light emitting diode / photodiode) are less sensitive to swings of the pendulum. Moreover, their lifetime is 10 times longer; they are more economical and require no additional circuitry of the temperature and the current stabilization. Signal / noise ratio in optical transducer is much higher than that of the capacitive and inductive.

A method for calculating the integrator and differentiator to adjust the frequency response of seismic sensors assembled on analog chips is proposed [5]. However, modern microcontrollers allow avoiding the analog control by adjusting the frequency response coefficients directly in equation (5), which in discrete representation looks as follows:

$$U(t) = Px(t) + I \sum_i \left[ \frac{x(t_i) + x(t_{i-1})}{2} \right] \Delta t + D[x(t + \Delta t) - x(t - \Delta t)] / 2\Delta t, \quad (6)$$

where  $\Delta t$  – time between subsequent measurements.

The operating principle of the digital seismometer (Fig. 4) is that the transmitter signal by analog-to-digital converter (ADC) is digitized and the control signal is calculated according to Eq. (6). Control signal generator with a pulse width modulation (PWM) is applied directly to an electromagnetic feedback coil.

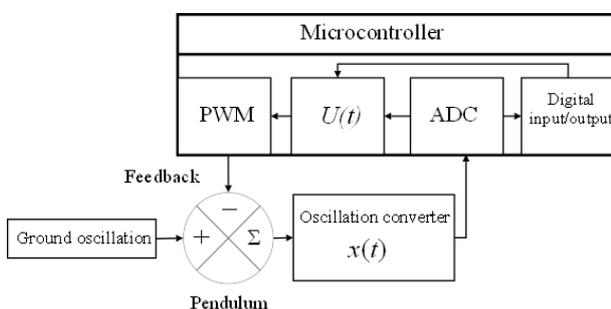


Fig. 4. Block diagram of a digital seismometer.

The digital input / output interface allows setting the seismometer by entering weighting coefficients and receiving a digital signal for data recording and visualization.

Obviously, this approach significantly simplifies the calibration procedure and allows remote configuration of the seismometer distantly using digital communications and the Internet.

### Discussion

There are many reasons to create over miniature digital broadband seismic sensors. Just based on ARM micro STM32F3 line it is possible to create a digital seismometer with a 90 dB dynamic range. When used with optical mapping technique, requiring no powerful magnet and a coil, such a device may be less than a matchbox, along with batteries and wireless digital communication means.

This miniaturization of devices allows solving a number of problems, like:

- decreasing the measurement equipment cost due to lower material consumption;
- reducing the cost of installing seismic sensors by stowing smaller diameter wells;
- delivery of equipment to remote places by unmanned aerial vehicles;
- creating systems for seismic spectrum images recognition, etc.

### Conclusions

The most effective way to expand the range of seismic sensors is the method of adjusting the frequency response by the feedback.

Using an optical method for converting seismic signals into mechanical allows high degree of oscillating system miniaturization and enables to get the highest level of signal / noise ratio of hardware.

The use of modern microcontroller to generate the feedback signal allows higher flexibility in adjusting the frequency response of a seismometer by a more convenient selection of weights and enables to perform remote configuration.

The work was carried out within the framework of the state budget topic on the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine

### Bibliography

- [1]. Berlage Jr., H. P., 1932. Seismometer, vol. 4 of Handbuch der Geophysik (ed. B. Gutenberg), chap. 4, pp. 299 - 526. Gebrueder

Borntraeger Verlag, Berlin.

[2]. A. V. Rykov. K probleme nablyudenij kolebanij Zemli. Apparatura, metody i rezul'taty sejsmometricheskikh nablyudenij. M., "Nauka", Sb. "Sejsmicheskie pribory", vyp. 12, 1979 g.

[3]. Wieland E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1982. Vol. 72. P.2349-2367.

[4]. Wielandt, E., 1983. Design principles of electronic inertial seismometers. In Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation, pp. 354-365. LXXXV Corso, Soc. Italiana di Fisica, Bologna.

[5]. Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in Earthquake Seismology / Modern Ap-

proaches in Geophysics. Springer Academic Publishers. 2002. P. 313.

[6]. Senigov P. N. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Konspekt lekcij. – Chelyabinsk: YUUrGU, 2000 - 93s.

[7]. V. K. Zhukovskiy, E. V. Karyagin, A. Yu. Popov. Application of an electrooptical converter of mechanical vibrations with a holographic optical element in seismometry // Technical Physics, 2010, Volume 55, Number 4, pages. 532-536.

[8]. M. A. Zumberge, J. Berger, E. Wielandt Optical Seismometer. Pub. No.: US 2012/0247213 A1, Pub. Date: Oct. 4, 2012.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2018 р.

PACS 93.85.+q

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142046

## EXPANDING THE BANDWIDTH OF A SEISMIC SENSOR

*V. Zhukovskiy<sup>1</sup>, A. Gokhman<sup>1</sup>, and L. Vilinska<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> South Ukrainian National Pedagogical University, Odessa, 65020, Ukraine

<sup>2</sup> Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 65029, Ukraine

### Summary

Sensitivity of seismic sensors to oscillations, whose frequency is lower than the frequency of natural oscillations of its inert mass, decreases exponentially. The technological reduction of the natural frequency below 1 Hz results in an unacceptable decrease of the device performance characteristics.

*The main goal* of this work was to investigate the possibility of improving the amplitude-frequency response (AFC) of sensor by introducing of a special type of feedback.

*Experimental and theoretical methods* of investigation were used. By selecting typical dynamic interrelations and weights in the MATCAD environment, an equation was obtained that provides the generation of a feedback signal. For the experimental model of an optical seismic sensor, whose natural oscillation frequency is about 10 Hz, the input signal was added with this signal.

*Results of the study.* It is found that solving of a feedback equation using a microcontroller and mixing this signal by means of pulse width modulation with an input signal provides the substantially simplify of the technology of manufacturing of seismic sensors.

*Conclusions.* By combining a direct solution of the equation to generate a feedback signal with an optical method of converting mechanical oscillations to electrical ones, seismic sensors with a high degree of miniaturization can be obtained by eliminating massive inductors and permanent magnets. Miniaturization of devices allows solving a set of problems:

- Reduction of the measuring equipment due to the lower consumption of materials;
- Reducing the cost of installing seismic sensors due to the smaller diameter of the filling wells;
- Delivery of equipment to hard-to-reach places by unmanned aerial vehicles;
- The creation of reconnaissance and signal systems with the recognition of seismic images from the spectrum of seismic vibrations, etc.

**Keywords:** seismic sensor, transfer function, bandwidth, signal-to-noise ratio

PACS 93.85.+q

DOI 10.18524/1815-7459.2018.3.142046

## РОЗШИРЕННЯ СМУГИ ПРОПУСКАННЯ СЕЙСМІЧНОГО СЕНСОРА

*В. К. Жуковський<sup>1</sup>, О. Р. Гохман<sup>1</sup>, Л. М. Вілінська<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського, Одеса, 65020, Україна

<sup>2</sup> Одеська державна академія будівництва і архітектури, Одеса, 65029, Україна

### Реферат

Чутливість сейсмічних сенсорів до коливань, частота яких нижче частоти власних коливань його інертної маси, експоненціально зменшується. Технологічне зменшення власної частоти нижче 1 Гц призводить до неприпустимого зниження експлуатаційних характеристик приладу.

*Метою* даної роботи було дослідження можливості поліпшення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) сенсора за рахунок введення зворотного зв'язку спеціального вигляду.

Застосовувалися експериментально-теоретичні *методи дослідження*. Шляхом підбору типових динамічних ланок та вагових коефіцієнтів в середовищі MATCAD, отримано рівняння, яке дозволяє генерувати сигнал зворотного зв'язку. Для експериментальної моделі оптичного сейсмічного сенсора, у якого частота власних коливань близько 10Гц, вхідний сигнал складався з цим сигналом.

*Результати дослідження*. Показано, що рішення рівняння зворотного зв'язку за допомогою мікроконтролера і змішування цього сигналу, за допомогою широтноімпульсної модуляції, з вхідним сигналом дозволяє істотно спростити технологію виготовлення сейсмічних сенсорів.

*Висновки*. Поєднуючи підхід безпосереднього вирішення рівняння для генерації сигналу зворотного зв'язку з оптичним способом перетворення механічних коливань в електричні можна отримати сейсмічні сенсори з високим ступенем мініатюризації за рахунок відмови від масивних котушок індуктивності і постійних магнітів. Мініатюризація приладів дозволяє вирішити цілий ряд проблем:

- здешевлення вимірювального обладнання за рахунок меншої витрати матеріалів;
- зменшення витрат на установку сейсмічних сенсорів за рахунок меншого діаметра закладних свердловин;
- доставка обладнання до важкодоступних місць безпілотними літальними апаратами;
- створення розвідувально-сигнальних систем з розпізнаванням сейсмічних образів по спектру сейсмічних коливань і т. п.

**Ключові слова:** сейсмічний сенсор, передавальна функція, смуга пропускання, співвідношення сигнал / шум