

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИСТРАТОРА СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ «РЕГИСТР»

УДК: 550.34

ББК: 26.3+85.11

Идентификационный номер Информрегистра: 0421200020\0039

### **Сенин Лев Николаевич**

доктор технических наук,  
Институт геофизики УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия



### **Сенина Татьяна Егоровна**

научный сотрудник лаборатории сейсмометрии,  
Институт геофизики УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия



### **Парыгин Геннадий Иванович**

старший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии,  
Институт геофизики УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия



### **Воскресенский Михаил Николаевич**

младший научный сотрудник лаборатории сейсмометрии,  
Институт геофизики УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия



### **Аннотация**

*В лаборатории сейсмометрии Института геофизики УрО РАН разработан комплекс, позволяющий проводить сейсродинамические исследования строительных объектов. Комплекс обеспечивает решение следующих задач:*

- 1. Определение частоты (периода) собственных колебаний объекта исследований в компонентах X, Y, Z на основе спектрального анализа сейсмической информации.*
- 2. Определение амплитуд смещений объекта исследований для трех компонент – X, Y, Z, в точке измерения.*
- 3. Расчет логарифмического декремента затухания для каждой из компонент X, Y, Z и для каждой точки измерения.*

### **Ключевые слова:**

*сейсродинамические исследования, регистратор сейсмических сигналов, амплитудно-частотный спектр, логарифмический декремент затухания*



Рис.1. Внешний вид регистратора сейсмических сигналов «Регистр-3М» в комплекте.

Проблема диагностики состояния зданий и сооружений всегда была актуальна, поскольку связана и с безопасностью людей, и с охраной окружающей природы. Строительная наука и геофизика, в частности сейсмометрия, подходят к ее решению по-разному. Строителей интересует, главным образом, статическое состояние изучаемого объекта, преимущественно свойства материалов, работа отдельных узлов конструкций. Сейсмометрия нацелена на анализ динамики сооружений. Сейсмические методы получили развитие в направлении изучения реакции сооружений на сильные воздействия, например, разработки В. С. Селезнева, А. Ф. Еманова [2].

В лаборатории сейсмометрии Института геофизики УрО РАН разработан комплекс, позволяющий проводить сейсродинамические исследования строительных объектов. При этом изучается реакция не столько на сильные упругие воздействия, сколько на относительно слабые, присутствующие практически постоянно

микросейсмические колебания в условиях городских застроек и промышленных объектов. Составляющими комплекса являются аппаратная часть, методический блок, программный модуль, включающий получение конечного результата. Очевидно, что перечисленные элементы играют важную роль и не могут существовать друг без друга в рамках отмеченного комплекса, который позволяет решать следующие задачи:

1. В диапазоне до 64 Гц определение частоты (периода) собственных колебаний объекта исследований в компонентах X, Y, Z на основе спектрального анализа сейсмической информации.

2. Определение амплитуд смещений объекта исследований для трех компонент – X, Y, Z, в точке измерения, вдоль профиля и по площади. Расчет полного вектора смещений в точке измерения.

3. Расчет логарифмического декремента затухания для каждой из компонент X, Y, Z и для каждой точки измерения на объекте.

Решение перечисленных выше задач может быть осуществлено достаточно оперативно, в том числе, непосредственно на объекте исследований. Напомним, что источником возбуждения при измерениях является микросейсмический шум естественного и техногенного происхождения, ветровые воздействия и т. п.

Рассмотрим отмеченные выше составляющие комплекса сейсродинамических исследований строительных объектов.

### **Аппаратурная часть**

Основой аппаратурной части комплекса является 3-канальный регистратор сейсмических сигналов «Регистр» [3, 4], укомплектованный 3-компонентным велосиметром электродинамического типа. Регистратор «Регистр» – это компактный, полностью автономный измерительный прибор, который может в течение нескольких часов осуществлять запись трех каналов сейсмической информации с временной привязкой. Внешний вид прибора показан на

Технические характеристики	
Число каналов	1 или 3
Входной импеданс	Дифференциальный 5k ohms // 0.01μF
Усиление	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, (128).
Частотный диапазон	0 – 64 Hz
Разрешение АЦП	16 или 24 bits
Шаг дискретизации	4, 8, 16, 32, 64, 128 msec
Встроенный календарь-часы	есть
Система	
Управляющий контроллер	AVR ATmega
Хранение данных	Флэш диск ≥ 12 Мбайт
Интерфейс	USB
Режимы работы	«Сейсмограмма», «Энергия».
Напряжение питания	10 ... 20 В
Ток потребления	30 мА(max)
Рабочая температура	-30 ... +40 °С
Масса	0.4 кг (max)

рисунке 1, а его основные технические характеристики приведены в таблице 1.

При проведении полевых измерений на объекте количество используемых регистраторов не регламентируется, а выбирается исходя из возможностей исследователя, сложности геометрии и размеров объекта. В принципе, если нет временных ограничений, даже чрезвычайно сложную строительную конструкцию можно обследовать всего одним прибором.

#### Методический блок

Методический блок комплекса сейсмодинамических исследований включает, во-первых, предварительную оценку сооружения с целью наиболее адекватного выбора точек размещения регистраторов. Приоритетными, как правило, являются точки, расположенные в верхней части объекта (крыша или чердачное помещение), его средней части и в основании. Во-вторых, следует оптимизировать такие параметры как время непрерывной записи в каждой точке наблюдения, частотный диапазон регистрации, коэффициент усиления. Эти параметры устанавливаются на основании выборки коротких (1-2 минуты) пробных записей в нескольких точках объекта исследований. Из опыта работ в данной области, можно сказать, что времени регистрации 15-20 минут в одной точке измерения обычно достаточно для правильного определения сейсмодинамических характеристик объекта исследований.

В качестве примера на рисунке 2 показана выбранная система наблюдений в одном из складских помещений г. Первоуральск.

Как видно, при исследованиях использовались 4 комплекта регистраторов «Регистр»,

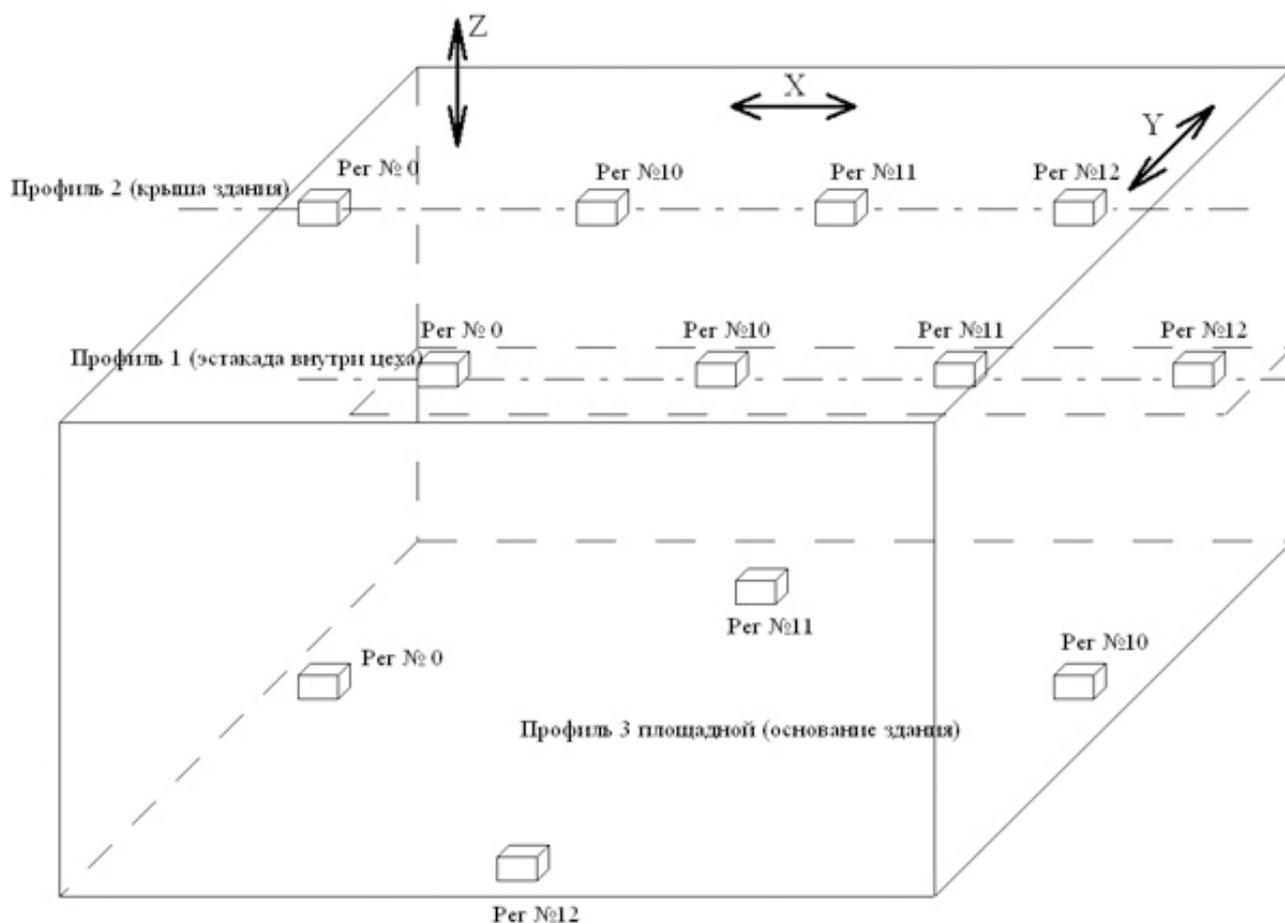


Рис. 2. Пример системы наблюдений на объекте (размещение регистраторов по профилям в здании складского помещения, г. Первоуральск).

которые размещались вдоль профильной линии 2 – на крыше здания, по профилю 1 – на эстакаде, проходящей вдоль одной из стен внутри цеха и, наконец, по площадному профилю 3 – в основании здания. Заметим, что в каждой точке сейсмические датчики всегда устанавливались идентично, а именно, компонента  $X$  – вдоль длинной стороны здания, компонента  $Y$  – вдоль короткой,  $Z$  выставляется автоматически.

Еще одним элементом методического блока можно назвать пользовательский интерфейс компьютерной программы управления и обмена данными, внешний вид которого показан на рисунке 3. Назначение его в установке выбранных параметров записи (длительность, частотный диапазон, коэффициент усиления, контроль реального времени, контроль флэш-диска) и передаче сейсмических данных из флэш-диска регистратора в память компьютера.

### Программный модуль

Заключительная составляющая комплекса – это программный модуль «Reg3M.exe», обладающий следующими основными возможностями:

- чтение данных из регистратора через USB-порт и сохранение сейсмограмм во внутреннем формате – этикетка с рабочими параметрами и блок сейсмических трасс;
- масштабирование сейсмических трасс по горизонтали и вертикали;
- расчет смещений;
- фильтрация сейсмограмм и отдельных трасс;
- расчет спектров для сейсмограмм и отдельных трасс;
- определение частоты (периода) основного тона по амплитудно-частотным спектрам сейсмограмм;
- расчет логарифмического декремента затухания для частоты основного тона.

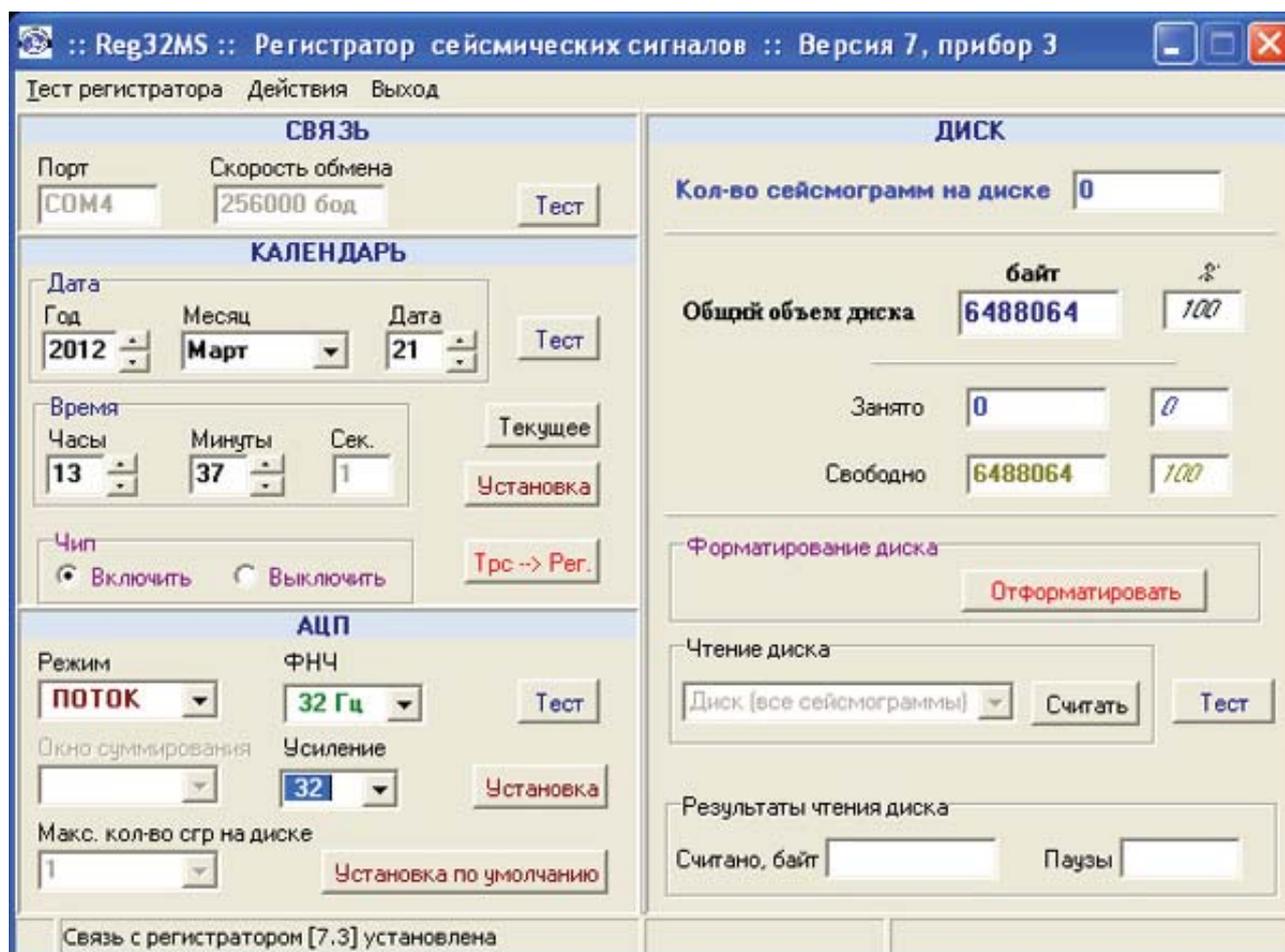


Рис. 3. Пользовательский интерфейс компьютерной программы управления и обмена данными регистратора «Регистр-3М»

Поскольку при расчете декремента затухания используются практически все процедуры, перечисленные выше, рассмотрим его вычисление на конкретном примере – обследовании башни разделения воздуха станции технических газов Первоуральского новотрубного завода (далее по тексту «башня»). Высота башни порядка 50 м, в сечении прямоугольник 9×5 м. При полевых наблюдениях вдоль башни (по высоте) были размещены 4 регистратора, как показано на рисунке 4.

Измерения проводились в частотном диапазоне 0...32 Гц в течение 15 минут. На рисунке 5 приведен фрагмент записи, полученной на регистраторе № 12.

На фоне интенсивных колебаний с периодом 0,8 сек наблюдаются незначительные высокочастотные флуктуации объекта. При этом, даже в Z компоненте видны значительные низкочастотные колебания. Качественно оценив полученный сейсмический материал, переходим к количественному спектральному анализу, также входящему в состав программы Reg3M.exe. В основе алгоритма спектрального анализа лежит нерекурсивная цифровая фильтрация (НЦФ) [5], представить которую можно в виде свертки массива последовательности цифровых отсчетов  $\{\Phi_n\}$  с функцией фильтра  $\{C_k\}$ :

$$Y_n = \sum_{k=-m}^m C_k \Phi_{n-k}, \quad (1)$$

где  $C_k$  – коэффициенты фильтра,  $\Phi_{n-k}$  – входные цифровые данные,  $Y_n$  – выходные цифровые данные. Для сглаживания характеристики фильтра в программной реализации НЦФ было использовано весовое окно Кайзера [4] с модифицированной функцией Бесселя нулевого

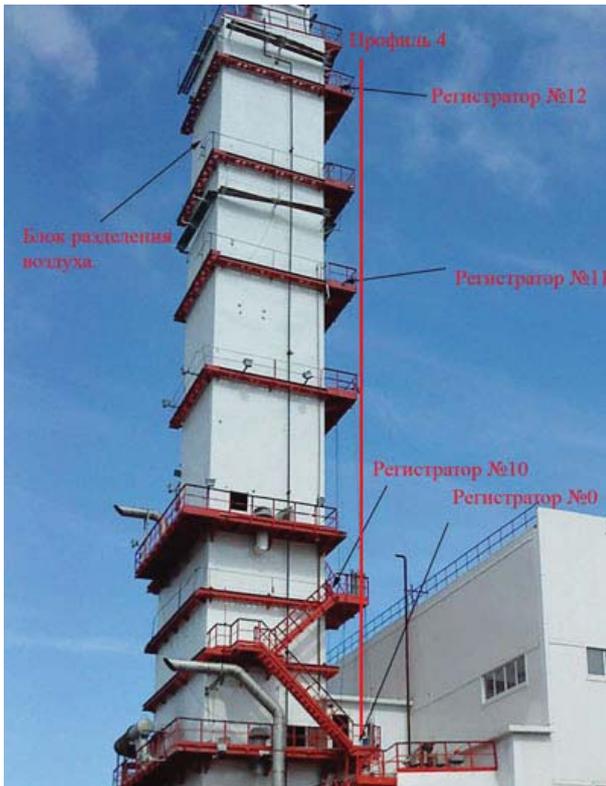


Рис. 4. Размещение регистраторов №№ 0, 10-12 вдоль башни по профилю 4.

порядка.

На рисунке 6 показан амплитудно-частотный спектр, рассчитанный с использованием 1280-точечного фильтра для частотного диапазона 0 – 32 Гц, с шагом 0,01 Гц.

Полученная информация об основном тоне колебаний изучаемого объекта дает основания для расчета чрезвычайно важного динамического параметра – декремента затухания.

Как известно, любая колебательная система с потерями при ее возбуждении совершает затухающие колебательные движения, описываемые по формуле:

$$Y(t) = A_0 e^{-\delta t} \sin(2\pi f t), \quad (2)$$

где  $Y(t)$  – величина перемещения колеблющегося тела;

$A_0$  – начальная амплитуда колебаний;  
 $f$  – частота колебаний;

$\delta$  – коэффициент затухания, физический смысл которого в том, что это величина,

обратная времени, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в «e» раз.

Однако коэффициент затухания не дает полного представления об интенсивности затухания, поэтому для характеристики интенсивности затухания ввели понятие логарифмического декремента затухания:

$$d = \ln A_n / A_{n+1}, \quad (3)$$

где  $A_n$  и  $A_{n+1}$  – амплитудные значения функции  $Y(t)$  для двух ее последовательных экстремумов при затухании. Из (2) и (3) получаем связь коэффициента затухания и логарифмического декремента:

$$\delta = d f_0 \quad (4)$$

Коэффициент затухания также связан с амплитудно-частотной характеристикой системы (АЧХ) формулой [1]:

$$\delta = \pi \Delta f, \quad (5)$$

где  $\Delta f$  – полоса пропускания колебательной системы на уровне 0,707 (-3 дБ) от максимума. Из соотношений (4) и (5) можно получить значение логарифмического декремента через АЧХ системы:

$$d = \pi \Delta f / f_0 \quad (6)$$

Таким образом, используя преобразование Фурье (1) и соотношение (6), удастся в условиях интенсивных промышленных помех рассчитать спектры колебательной системы, вычленив  $f_0$  – наиболее вероятную частоту собственных колебаний и найти логарифмический декремент затухания для каждого значения  $f_0$ .

Описанные выше теоретические положения полностью реализованы в программной части комплекса и входят в состав программы Reg3M.exe v. 8.0.1.1.

В результате расчетов декремента затухания, проведенных с использованием

спектрограммы (рис.6), были получены следующие значения  $d$ :

для  $X$  компоненты  $f_0 = 1,38$  Гц;  $d = 0,0705$

для  $Y$  компоненты  $f_0 = 1,22$  Гц;  $d = 0,0504$

для  $Z$  компоненты  $f_0 = 1,22$  Гц;  $d = 0,1302$

Напоминаем, что данные значения приводятся в качестве примера и относятся только к одной точке измерения на объекте.

### **Заключение**

Таким образом, разработанный в лаборатории сейсмометрии ИГф УрО РАН комплекс сейсродинамических исследований позволяет осуществлять оперативную оценку состояния строящихся или эксплуатируемых объектов, в частности, в соответствии с ГОСТ Р 53778 – 2010, введенным в действие Приказом №37-ст Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии 25 марта 2010 г.

Этот же комплекс с успехом может использоваться для многолетних мониторинговых наблюдений за объектом, также в соответствии с упомянутым выше ГОСТом.

### **Библиография**

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г.И. Атабеков. – М.: Энергия, 1978. – 592 с.

2. Еманов А.Ф., Селезнев В.С. Инженерно-сейсмологические исследования зданий и крупных промышленных сооружений с использованием мощных вибрационных источников / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев // Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004. – С. 270-296.

3. Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Регистратор сейсмических сигналов «Регистр» / Л.Н. Сенин, Т.Е. Сенина // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2005. – № 6. – С. 141-142.

4. Уткин В.И., Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Полевая аппаратура и способ сейсмического мониторинга. Патент RU 2265867. Зарегистрирован 14.06.2005 г.

5. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. / пер. с англ. Лисина В.Н. под ред. Потапова О.А. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

**Статья поступила в редакцию 04.04.2012**

## EXAMINATION OF THE SEISMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF BUILDINGS USING THE “REIGSTR” RECORDER OF SEISMIC SIGNALS”

**Senin Lev N.**

DSc. (Engineering), Head, Seismometric Laboratory,  
Institute of Geophysics, the Ural Division of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia

**Senina Tatiana Ye.**

Researcher,  
Seismometric Laboratory Institute of Geophysics,  
the Ural Division of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia

**Parygin Gennady I.**

Senior Researcher,  
Seismometric Laboratory Institute of Geophysics,  
the Ural Division of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia

**Voskresensky Mikhail N.**

Junior Researcher,  
Seismometric Laboratory Institute of Geophysics,  
the Ural Division of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg, Russia

### Abstract

*Diagnosis of man-made structures has always been important because it is linked with human and environmental safety. Civil engineering and geophysics, seismometry in particular, approach this issue differently. Civil engineers are interested mainly in the statics of a project, specifically the properties of materials and the operation of individual assembly units. Seismometry aims to analyse the dynamics of constructions. Seismic methods have been developed for studying the response of structures to strong impacts. The article reviews an instrument that enables engineers to conduct seismodynamic examination of buildings based on their response to weak microseismic impacts in urban fabric in the context of industrial noise rather than to strong elastic impacts. The instrument ensures efficient assessment of the condition of work in progress or existing buildings in accordance with the standard GOST P 53778 – 2010 put into effect by Order No. 37 of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology on 25 March 2010.*

### Key words

*seismodynamic examination, seismic signal recorder, amplitude-frequency spectrum*