

В.К. САРКИСЯН, Р.Е. САРКИСЯН

НЕКОТОРЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СЕЙСМОМЕТРИИ

Исследуются вопросы необходимого динамического диапазона, предела погрешности сейсмометров, уточняются их основные метрологические характеристики. Обосновывается, что измерение сейсмических колебаний одним прибором с динамическим диапазоном 120 дБ и погрешностью менее 3 % нереально. Сейсмометры в обязательном порядке должны пройти поверку на аттестованном вибростенде.

Ключевые слова: метрология, погрешность, динамический диапазон, сейсмометр, акселерометр.

Многолетняя работа в области сейсмометрии в Республике Армения привела к заключению, что вопросам метрологии в сейсмометрии не уделяется должного внимания, при этом каждый исследователь имеет свой подход к вопросам метрологии. В результате нарушается единство и точность измерения в сейсмометрии. В рекламной литературе по сейсмометрии встречаются сейсмометры с погрешностью 0,2 дБ [1] и с динамическим диапазоном 155 дБ [2]. При этом не разъясняется, что понимается под “погрешностью” (какая погрешность, или это повторяемость показаний), что означает “динамический диапазон измеряемого параметра” (или возможная точность отсчета, разрядность преобразователя).

Целью настоящей работы является уточнение основных метрологических характеристик сейсмометров, обоснование их необходимого динамического диапазона измерения и технически возможного предела основной погрешности. Обсуждаются проблемы инженерной сейсмологии, т.е. сейсмометров, предназначенных для решения главного вопроса инженерной сейсмологии, а именно: определение для данной строительной площадки максимальных значений скорости или ускорения колебаний почвы и частоты этих колебаний. В инженерной сейсмологии в отличие от региональной сейсмологии нижний предел частоты колебаний почвы принято считать 0,2 Гц.

Для четкости уточним некоторые метрологические понятия, встречающиеся в сейсмометрии. Из теории сейсмометрии [3,4] известно, что колебания маятника будут пропорциональны:

- амплитуде колебаний почвы, если собственная частота маятника более чем в два раза меньше частоты колебания почвы, а относительное затухание маятника находится в пределах 0,55...0,65. Верхний предел измеряемых колебаний ограничивается резонансом деталей сейсмометра;

- скорости колебания почвы, если относительное затухание маятника больше единицы (желательно $D \geq 5$), причем нижний и верхний пределы частоты измеряемых колебаний определяются формулами

$$f_{\min} = f_0 / D, \quad f_{\max} = f_0 D,$$

где f_0 - собственная частота маятника; D - относительное затухание;

- ускорению колебаний почвы, если собственная частота маятника больше частоты колебания почвы и чем больше, тем шире диапазон измерения колебаний почвы.

Каждый сейсмометр состоит из двух основных частей – маятника, который является чувствительным элементом параметров колебаний в зависимости от параметров маятника, и преобразователя колебания маятника в электрический сигнал.

В качестве преобразователя используют емкостный, электродинамический и т.д. датчики.

Следует отметить, что электродинамический датчик является дифференцирующим звеном, так как его выходное напряжение пропорционально скорости движения катушки в магнитном поле. Поэтому, если измерять электродинамическим датчиком колебания маятника, предназначенного для измерения скорости почвы, то выходной сигнал будет пропорциональным ускорению почвы.

Метрологические характеристики сейсмометра зависят от метрологических характеристик маятника и преобразователя.

Метрологическими характеристиками сейсмометра маятника являются:

- нелинейность амплитудной характеристики, которая определяет зависимость выходного сигнала сейсмометра от колебания почвы на базовой частоте;

- неравномерность амплитудно-частотной характеристики, которая определяет зависимость выходного сигнала от частоты колебания почвы при постоянной амплитуде;

Как правило, эти зависимости имеют отклонения от линейности, что характерно для данного маятника, и являются систематическими погрешностями, которые, в принципе, можно учесть как поправки.

Основной метрологической характеристикой преобразователя является его коэффициент преобразования или чувствительность. Его погрешность является случайной погрешностью.

Обобщая вышеизложенное, приходим к заключению, что предел суммарной средней квадратической погрешности сейсмометра должен определяться согласно ГОСТ 8 207-76 [5] по формуле

$$S^2 = \frac{(Q_{\max}^f)^2}{3} + \frac{(Q_{\text{mfx}}^a)^2}{3} + \sigma(K_i)^2,$$

где $Q_{\max}^a$, $Q_{\max}^f$ – максимальные значения нелинейности амплитудной и неравномерности амплитудно-частотной характеристик; $\sigma(K_i)$ – средняя квадратическая ошибка коэффициента преобразования. Затем согласно ГОСТ 8 207-76 следует определить предел погрешности измерений по формуле

$$\Delta = k S,$$

где коэффициент k зависит от соотношений случайной и систематической погрешностей (ГОСТ 8 207-76). Истинным значением измеряемой величины будет среднее арифметическое полученных результатов наблюдений с найденным отклонением:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \pm k S.$$

Часто в технических характеристиках виброизмерительной аппаратуры нормируется не суммарная погрешность, а отдельно нелинейность амплитудной характеристики, неравномерность амплитудно-частотной характеристики и коэффициент преобразования (или чувствительность).

Рассмотрим вопросы оценки диапазона измерения и погрешности измерения сейсмометра. В инженерной сейсмологии принято, что частотный диапазон сейсмических колебаний находится в пределах 0,2 ... 50 Гц с динамическим диапазоном амплитуд колебаний 120 дБ.

Для обоснования динамического диапазона обсудим шкалу балльности MKS- 64 [6].

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что отношение максимальных и минимальных амплитуд составляет 1066 или ~60 дБ, т. е. в сейсмологии для регистрации землетрясений силой от 1 до 10 баллов надо иметь сейсмометры с динамическим диапазоном измерений амплитуд ~60 дБ.

Таблица 1

Сила землетрясения в баллах	Максимальное ускорение почвы, см/с ²	Максимальная скорость почвы, см/с	Максимальное смещение по сейсмометру СБМ, см
1	0,75...1,5	0,06...0,175	0,03...0,06
10	400...800	32,1...64	16,1...32
Максимальный динамический диапазон	800/0,75 =1066	64/0,06 =1066	32/0,03 =1066

Если иметь в виду и землетрясения до 12 баллов, то динамический диапазон увеличивается не более чем до 80 дБ.

Обсудим вопрос реально достигаемого предела погрешности сейсмометров.

Сейсмометр является виброметром, работающим в диапазоне частот 0,2 ...50 Гц. Это означает, что его поверка должна соответствовать ГОСТ 8 138-84 [7]. В этом документе в качестве образцовых средств измерений применяют *виброустановки для воспроизведения* виброускорения в диапазоне $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2$, виброскорости и виброперемещения с доверительной *относительной* погрешностью от $2,5 \cdot 10^{-2}$ до $6 \cdot 10^{-2}$ (2,5 ... 6 %) в диапазоне частот $3 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^4 \text{ Гц}$, при доверительной вероятности 0,95. Понятно, что рабочие сейсмометры не могут быть точнее образцовых средств воспроизведения колебаний первого порядка, т. е. они должны иметь предел суммарной погрешности результата измерений не менее чем от $2,5 \cdot 10^{-2}$ до $6 \cdot 10^{-2}$ с доверительной вероятностью 0,95 (2,5 ... 6 %).

Отсюда следует, что относительная погрешность 3% является предельной точностью для сейсмометров и должна быть исходной величиной для определения диапазонов измерения сейсмометров, исходя из следующих соображений.

Допустим, что параметры колебаний преобразуются в электрическое напряжение, которое можно надежно измерять с абсолютной погрешностью 5 мВ. Коэффициент преобразования равен

$$K=U/X, \quad (1)$$

где X- ускорение, скорость или смещение; U – выходное напряжение. Имея в виду, что

$$X_{\min} = \frac{U_{\min}}{K}, \quad X_{\max} = \frac{U_{\max}}{K}, \quad \frac{X_{\max}}{X_{\min}} = 1066,$$

при $U_{\min} = 5 \text{ мВ}$ получим

$$U_{\max} = U_{\min} \frac{X_{\max}}{X_{\min}} = 5 \text{ мВ} \cdot 1066 = 5330 \text{ мВ} = 5,33 \text{ В}.$$

Для коэффициента преобразования сейсмометров ускорения, скорости и перемещения получим величины, приведенные в табл. 2. Заметим, что максимальный выходной сигнал будет измерен с относительной погрешностью 0,1%, а минимальный – 1%, что более чем достаточно.

Приведенные в табл.2 коэффициенты преобразования обеспечивают достаточную точность измерения выходного напряжения. Точность же воспроизведения колебаний с заданными параметрами, как показано выше, ограничивается 3%. Отсюда можно сделать вывод, что увеличение точности отсчета выходного напряжения не увеличивает точности измерения скорости или ускорения колебательного процесса. В данном случае увеличение точности отсчета не приводит к увеличению точности измерения, и для преобразования аналогового выходного сигнала сейсмометра в цифровой код достаточно иметь сейсмометры не менее чем 10 и не более чем 12-разрядные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), что обеспечивает точность отсчета с относительной погрешностью 0,09 и 0,02 %.

Таблица 2

Параметр	Ускорение	Скорость	Перемещение
Коэффициент преобразования K	$5,33 / 8 =$ $= 0,67 \text{ В} / (\text{м} / \text{с}^2)$ $(\sim 1 \text{ В} / (\text{м} / \text{с}^2))$	$5,33 / 0,64 =$ $= 8,33 \text{ В} / (\text{м} / \text{с})$ $(\sim 10 \text{ В} / (\text{м} / \text{с}))$	$5,33 / 0,32 =$ $= 16,65 \text{ В} / \text{м}$ $(\sim 20 \text{ В} / \text{м})$
$U_{\min} = K X_{\min}$	0,005 В	0,005 В	0,005 В
Максимальный динамический диапазон (см. табл. 1)	$800 / 0,75 = 1066$ $(\sim 60 \text{ дБ})$	$64 / 0,06 = 1066$ $(\sim 60 \text{ дБ})$	$32 / 0,03 = 1066$ $(\sim 60 \text{ дБ})$

Таким образом, приведенные в табл. 3 технические характеристики сейсмометров представляются наиболее реальными и оптимальными.

Таблица 3

	Тип сейсмометра	Диапазон измерения	Диапазон частот, Гц	Коэффициент преобразования	Погрешность, %	Динамический диапазон, дБ
1	Сейсмометр скорости	0,06...6 см/с (1...7 балл)	0,2...20	10 В / (м/с)	3...6	40
2	Сейсмометр ускорения	0,012...1.2 м/с ² (2- 12 балл)	0,2...50	1 В / (м/с ²)		40

В табл. 3 сейсмометры скорости и ускорения имеют общую часть измеряемых величин. Это удобно тем, что для получения записи скорости отпадает интегрирование акселерограммы. Кроме того, при малых колебаниях целесообразно записать скорость ввиду большого коэффициента усиления сейсмометра скорости. При этом, разделяя общий динамический диапазон 80 дБ на две части, увеличим точность измерения на каждом диапазоне.

В последние годы промышленность выпускает микросхемы – акселерометры. Это позволяет, не увеличивая габаритные размеры, иметь в одном корпусе одновременно сейсмометры скорости и ускорения.

Следует также иметь в виду, что при проектировании сооружения по методике СНиП [8] с учетом различных параметров почвы, естественно, делаются некоторые неизбежные округления, которые определяют конечный результат с неизбежной погрешностью 10...20%, что тоже указывает на то, что погрешность определения максимальных ускорений или скоростей с точностью 3 % более чем достаточна.

Не менее важным является методика поверки сейсмометров [9], ибо каждый исследователь по своей методике проводит поверку, нарушая этим единство измерения в сейсмометрии.

Ввиду отсутствия калибровочных вибрационных стендов часто сейсмометры калибруют в статическом режиме, т.е. определяют только коэффициент преобразования К электродинамического датчика скорости, используя соотношение

$$K = \frac{U}{V} = \frac{F}{I},$$

где U - выходной сигнал; V - скорость движения катушки; F- сила, действующая на катушку, когда через нее протекает I ток. Измеряют I и F. Очевидно, что при этом игнорируют характеристиками маятника, что приводит к значительным ошибкам, порядка 20%. Иногда калибровку сейсмометра выполняют методом, суть которого заключается в следующем. На катушку электродинамического датчика дополнительно наматывают вторую обмотку. Пропуская переменный ток через эту обмотку, подвергают маятник колебаниям и измеряют выходной сигнал первой обмотки. Здесь не учитывается индукционная связь между обмотками, которая может быть значительной, особенно при частотах выше 5 Гц. Если на маятнике установить электродинамический вибратор, с помощью которого заставлять колебаться маятник, то индукционная связь между

катушками будет отсутствовать, но при этом необходимо лазерным интерферометром измерять амплитуду колебания маятника.

Таким образом, оптимальным и правильным решением является калибровка сейсмометра на вибрационном стенде. Такой стенд разработан и аттестован в СОКТИ НАН Армении.

Применение различных методов калибровки и оценки метрологических характеристик сейсмометров нарушает единство методов. Видимо, этим объясняется тот факт, что приведенные в рекламной литературе метрологические характеристики некоторых сейсмометров непонятны, т. к. нередко путается точность отсчета некоторой величины с точностью её измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. VE-53 Triaxial Velocity Sensor. GeoSIG. E-mail: info@geosig.com .
2. Shallow Borehole EpiSensor. Kinematics. <http://www.kinematics.com> .
3. **Саваренский Е. Ф., Кирнос Д.П.** Элементы сейсмологии и сейсмометрии. -М., 1955. - 531 с.
4. **Максимов Л.С., Шейнин И.С.** Измерение вибрации сооружений . -Л.: Стройиздат, 1974. -251 с.
5. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Метод обработки результатов наблюдений. Основные положения. - 9 с.
6. **Խաչիյան Է.** Շրջանային երկրաշարժագիտություն. - Երևան, Գիտություն, 2001. – 310 էջ.
7. ГОСТ 8.138-84. Государственный специальный эталон и Государственная поверочная схема для измерений виброперемещений, виброскорости и виброускорений в диапазоне $3 \cdot 10^{-1}$ - $2 \cdot 10^4$ Гц . - 4 с.
8. Մեխանիկայի շինարարության նախագծման նորմեր. - Երևան, 2006, ՀՀՇՆ 11-6.02.2006:
9. **Саркисян Р.Е., Саркисян В. К.** Типовая методика динамической поверки сейсмометров // Сборник научных трудов конференции, посвященной 100-летию **А.Г. Назарова**. - Ереван: Изд. “Титутюн”, НАН РА, Гюмри, 2008. – 524 с.

Ин-т геофизики и инженерной сейсмологии Гюмри. Материал поступил в редакцию 11.06.2009.

Վ.Կ. ՄԱՐԳՍՅԱՆ, Ռ.Ե. ՄԱՐԳՍՅԱՆ

ՄԵՅՍՄՈՄԵՏՐԻԿԱՅՈՒՄ ՉԱՓԱԲԱՆԱԿԱՆ ՄԻ ՔԱՆԻ ՀԱՐՑԵՐԻ
ՄԱՍԻՆ

Քննարկվում են սեյսմոմետրերի դինամիկական տիրույթի, հարաբերական սխալի սահմանի հարցերը, ճշտվում են սեյսմոմետրի մի քանի չափաբանական բնութագրեր: Հիմնավորվում է, որ սեյսմիկ տատանումների պարամետրերը իրատեսական չէ չափել այնպիսի սարքով, որն ունենա 120Դբ դինամիկական տիրույթ և 3%-ից փոքր սխալ: Բոլոր սեյսմոմետրերը պետք է ստուգաչափվեն ատեստավորված վիբրացիոն կայանքի օգնությամբ:

Առանցքային բառեր. չափաբանություն, սխալ, դինամիկական տիրույթ, սեյսմոմետր, արքսելերոմետր:

V. K. SARGSYAN, R. E. SARGSYAN

ON SOME METROLOGICAL PROBLEMS IN SEISMOMETRY

Problems of limiting the relative error and dynamic range of seismometers are discussed. Their measuring characteristics are defined. It is substantiated that it is unreal to measure the parameters of seismic vibrations with one device which has a dynamic range of 120dB and an error smaller than 3%. All seismometers must be verified by a vibration stand –testing machine.

Keywords: metrology, error, dynamic range, seismometer, accelemereter.