

Стандартизация показателей и методов испытаний электродинамических сейсмоприемников

А.В. Стакло, В.С. Симаков, С.А. Федотов, ГФУП ВНИИГеофизика, г. Москва

Сейсмоприемники являются первичными измерительными преобразователями (датчиками) в системе приема и регистрации сейсмических колебаний. От метрологических показателей сейсмоприемника и решающей мере зависит разрешающая способность приемной аппаратуры, возможность выделения полезного сигнала и, следовательно, точность и информативность сейсмических исследований.

В настоящее время отсутствует нормативный документ, содержащий аттестованные методики выполнения измерений параметров и характеристик сейсмоприемников. Задача разработки такого документа была поставлена перед ВНИИГеофизикой. Для ее решения было необходимо провести разносторонний анализ существующих методов и отобрать из них наиболее точные, экономичные и удобные для практического использования. Следовало также рассмотреть историю создания нормативных документов по сейсмоприемникам.

1. История стандартизации сейсмоприемников.

Первый государственный стандарт в области сейсморазведки ГОСТ 13002-67 "Сейсмоприемники полевые электродинамические. Типы и основные параметры" был введен в действие в 1967 г. Хотя этот стандарт регламентировал всего 4 параметра, сам факт установления их значений вызывал необходимость разработки методики их определения. Поэтому в 1972 г. был разработан, а с 1974 года введен в действие ГОСТ 18274-72 "Сейсмоприемники полевые электродинамические. Методы испытаний". Стандарт расширил по отношению к ГОСТ 13002 номенклатуру и впервые устанавливал методику определения следующих параметров сейсмоприемников:

- частота собственных колебаний (ныне собственная частота),
- чувствительность (ныне коэффициент преобразования),
- отношение коэффициента затухания к круговой собственной частоте (ныне степень затухания),
- частота второго электромеханического резонанса,
- фазовая неидентичность,
- сопротивление изоляции.

Предусматривалось определение также и функций влияния:

- влияние наклона,
- устойчивость к высокой и низкой температуре, вибрации, ударным воздействиям,
- прочность при транспортировании.

Функции влияния определялись по изменению двух параметров: частоты собственных колебаний и степени затухания.

Кроме того, предусматривалось определение конструктивного показателя - полириности.

При проведении испытаний в ГОСТ 18274-72 предусматривалось использование в основном метода электрического возбуждения сейсмоприемника, и только коэффициент преобразования должен был определяться на измерительной виброустановке.

Следующий шаг в стандартизации сейсмоприемников был сделан в 1988 г. введением в действие ГОСТ 4378 [1]. В этом стандарте еще более была расширена номенклатура показателей. Только перечень показателей назначения включает 17 параметров. Были впервые введены такие важные параметры, как коэффициент нелинейных искажений, относительный коэффициент поперечного преобразования, максимальный выходной сигнал. Но для собственной частоты, степени затухания, коэффициента преобразования устанавливались лишь отклонения от номинального значения, сами же указанные параметры в перечень показателей назначения не вошли.

В 1990 г. введен в действие ГОСТ 28134 [3]. Он установил определенную классификацию сейсмоприемников (типы), основные параметры и технические требования к сейсмоприемникам, но не регламентировал методику испытаний. Стандарт содержал некоторые неудачные решения. Например, вместо коэффициента преобразования ввел искусственную и не поддающуюся прямому измерению величину показателя преобразования, равный коэффициенту преобразования, деленному на корень квадратный из сопротивления катушки. Значения параметров регламентировались по двум классам, причем требования ко II классу устанавливались недопустимо низкие. Стандарт продолжает действовать до настоящего времени, хотя уже давно его уровень стал не адекватен современным требованиям к сейсмоприемникам.

ГОСТ 18274-72 долгое время так и оставался единственным нормативным документом на методы испытаний сейсмоприемников. И хотя этим документом предусматривались методы контроля только отдельных параметров сейсмоприемников, что в настоящее время недостаточно, приходится сожалеть, что вместо совершенствования он был отменен.

В 1994 г. разработаны стандарты Евро-Азиатского геофизического общества (ЕАГО), устанавливающие номенклатуру основных параметров сейсмоприемников, единицы их измерений и обозначения, а также методику определения этих параметров [4, 5]. Эти документы предназначались для созданной в ЕАГО добровольной системы сертификации геофизической продукции. В стандарте [5] впервые предусмотрено прямое определение полных метрологических характеристик сейсмоприемника амплитудно-фазовой характеристики как совокупности характеристик амплитудно-частотной и фазово-частотной, а также переходной характеристики. Они позволяют детально описать работу сейсмоприемника и при необходимости определить все частные параметры.

Практическое применение стандартов ЕАГО показало, что в основном документы удовлетворяют требованиям сейсморазведки, однако необходимо их совершенствование на базе новейших разработок в области метрологического обеспечения сейсморазведки.

В настоящее время существуют и применяются две группы методов испытаний сейсмоприемников с использованием механического входного сигнала, задаваемого вибростендом и с использованием электрического входного сигнала от

генератора высокой частоты. Каждый метод возбуждения сейсмоприемника имеет свои достоинства и недостатки.

Механическое возбуждение методологически безупречно: сейсмоприемник работает в том же режиме измерительного преобразователя (датчика), что и при полевых работах, в полном соответствии с определением, данным выше. При этом возможно определить абсолютно все его основные метрологические характеристики. Исключение — определение сопротивления (импеданса).

Однако при этом необходим высококачественный стэнд, с малыми нелинейными искажениями. Такими стэндами могут быть оборудованы лишь метрологические центры.

Использование электрического возбуждения возможно практически в любой лаборатории или партии. Электрические генераторы имеют гораздо более высокие метрологические показатели по сравнению с вибростэндами. Но сейсмоприемник в этом случае работает не как электромеханический преобразователь, а как некоторый электрический двухполюсник [10]. По некоторым параметрам двухполюсника можно судить о параметрах сейсмоприемника, но могут возникать и методические погрешности. Поэтому требуется детальный анализ работы сейсмоприемника в том и другом режиме. Он позволит выбрать оптимальный набор методов для решения конкретной задачи, поставленной перед испытаниями.

2. Теоретические основы стандартизации методов испытаний

Для разработки стандарта на испытания должны быть четко обозначены теоретические представления о работе сейсмоприемника. Однако в геофизической литературе имеют место определенные разногласия по этому вопросу. Поэтому необходимо вкратце привести теорию сейсмоприемника.

Полные динамические характеристики сейсмоприемника

Согласно [2] к полным динамическим характеристикам, относятся:

- дифференциальное уравнение,
- передаточная функция,
- переходная характеристика,
- импульсная переходная характеристика,
- амплитудно-фазовая характеристика.

Составим **уравнение движения груза** (подвижной катушки) электродинамического сейсмоприемника относительно его корпуса. Обозначим:

x - смещение груза относительно корпуса,

ξ - смещение корпуса сейсмоприемника относительно неподвижной системы координат.

Направление осей x и ξ примем одинаковым. Тогда смещение груза относительно неподвижной системы координат равно $x + \xi$.

На груз действуют сила упругости пружин, усилие демпфера, направленные в сторону, противоположную перемещению x , и сила инерции. На вертикальный сейсмоприемник действует также сила тяжести, но она компенсируется начальным прогибом пружин. Влияние силы тяжести будет иметь место при исследовании влияния наклона на показатели сейсмоприемника (см. ниже).

Полное ускорение груза равно $\ddot{x} + \ddot{\xi}$. Следовательно, уравнение движения груза

$$m(\ddot{x} + \ddot{\xi}) = -cx - h\dot{x}, \quad (1)$$

где m — масса груза,
 c — жесткость пружин,
 h — коэффициент сопротивления.

Обычно уравнение сейсмоприемника представляют после осевидных преобразований в виде

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = -\ddot{\xi}, \quad (2)$$

где ω_0 — собственная угловая частота,

β — относительное демпфирование, называемое в сейсморазведке степенью затухания.

В геофизической литературе можно найти противоречивые мнения относительно знака в правой части уравнения (2). Часть геофизиков пишет уравнение сейсмоприемника в приведенной форме, другие считают, что справа должен стоять знак "плюс". Обзор мнений на этот счет помещен в [8]. Авторы не видят принципиальных отличий между обоими способами описания сейсмоприемника. Все дело только в том, как направлены оси x и ξ . Если в одну сторону получается уравнение (2). Но не будет ошибкой считать за положительное направление x противоположное. В этом случае в правой части уравнения будет знак "плюс". Для сейсморазведки важно лишь, чтобы все сейсмоприемники в данной измерительной системе имели одинаковую полярность. В теории же разница будет проявляться лишь в сдвиге фазово-частотной характеристики на постоянную величину 180° .

Электрическое напряжение на выходе сейсмоприемника

$$E(t) = K_0 \dot{x}, \quad (3)$$

где K_0 — коэффициент преобразования.

Из (2) и (3) находится **передаточная функция сейсмоприемника** относительно ускорения корпуса $\ddot{\xi}$:

$$\Phi_1(p) = K_0 \frac{-p}{p^2 + 2\beta\omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (4)$$

В сейсморазведке, как известно, рассматривается скорость смещения корпуса сейсмоприемника относительно неподвижной системы координат и скорость смещения груза относительно корпуса. В этом случае передаточная функция принимает несколько иной вид:

$$\Phi(p) = K_0 \frac{-p^2}{p^2 + 2\beta\omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (5)$$

где K_0 — коэффициент преобразования.

Пронормировав передаточную функцию (5) по коэффициенту преобразования и подставив в (5) $p = j\omega$ получаем **амплитудно-фазовую характеристику**:

$$\Phi(j\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j \cdot 2\beta\omega_0\omega} = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (6)$$

где $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ — **амплитудно- и фазово-частотные характеристики АЧХ и ФЧХ**:

$$A(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega_0^2\omega^2}}, \quad (7)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\beta\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (8)$$

Определяя АЧХ и ФЧХ для ряда частот, из выражений (7, 8) можно определить неизвес-

СЕЙСМОПРИЕМНИКИ: СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

тные величины собственную частоту ω_0 и степень затухания сейсмоприемника β

$$\omega_0^2 = \omega^2 \left[1 + \frac{\cos \varphi(\omega)}{A(\omega)} \right] \quad (9)$$

$$\beta = - \frac{\sin \varphi(\omega)}{2\omega_0 \omega A(\omega)} \quad (10)$$

Метод определения частных параметров по АЧХ и ФЧХ не только методически чистый, но и, как показали практические измерения, наиболее точный. Поэтому он включен в разработанный стандарт в качестве арбитражного.

Рассмотрим далее определение и использование **переходной характеристики**.

Для передаточной функции (4) она определяется как реакция на единичную ступень ускорения:

$$h(t) = \frac{K_0}{\omega_1} \exp(-\beta \omega_0 t) \sin \omega_1 t, \quad (11)$$

где $\omega_1 = \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0$ - видимая угловая частота переходного процесса.

Для сейсмоприемника переходная характеристика определяется по (5), как реакция на единичную ступень скорости:

$$h(t) = K_0 \exp(-\beta \omega_0 t) \left[\cos \omega_1 t - \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin \omega_1 t \right]. \quad (12)$$

Переходная функция сейсмоприемника в виде (11) приведена в книге [11], в виде (12) в [10] без указания, каков входной сигнал. Это иногда приводит к недоразумениям.

На практике практически невозможно механически задать ступень скорости или ускорения. Поэтому **переходный процесс сейсмоприемника удобнее изучать при электрическом возбуждении**.

В этом случае на сейсмоприемник действует не сила инерции $m\ddot{\xi}$, а электромагнитная сила $K_0 I$, где I - входной электрический ток. Следовательно, вместо ξ в правой части уравнения (2) будет величина $K_0 I / m$.

При этом к полезному выходному напряжению добавляется падение напряжения на сопротивлении R и индуктивности L катушки. Передаточная функция в этом случае имеет смысл комплексного сопротивления:

$$\Phi(p) = \frac{K_0^2}{m} \frac{p}{p^2 + 2\beta \omega_0 p + \omega_0^2} + R + pL \quad (13)$$

и переходная характеристика

$$h(t) = \frac{K_0^2}{m \omega_0} \exp(-\beta \omega_0 t) \sin \omega_1 t + R + \delta(t)L. \quad (14)$$

Иногда удобнее в качестве входного сигнала при испытаниях задавать импульс тока, т.е. исследовать импульсную переходную характеристику

$$g(t) = \frac{K_0^2}{m} \exp(-\beta \omega_0 t) \left[\cos \omega_1 t - \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin \omega_1 t \right] + R\delta(t) + \delta'(t)L. \quad (15)$$

Последние члены в (14), (15) описывают кратковременные импульсы напряжения в

начале переходных процессов, незаметные при обычных измерениях с помощью осциллографа, но весьма существенные при аналого-цифровых преобразованиях.

Дискретное описание сейсмоприемника

В современной сейсморазведке используется исключительно цифровые сейсмостанции и компьютерная обработка материалов К. Сожалению, методы испытаний сейсмоприемников в этом отношении несколько отстали. Для того чтобы адаптировать их к цифровой обработке, рассмотрим некоторые вопросы дискретного представления характеристик сейсмоприемников. Такое представление позволит использовать не применявшиеся ранее методы вычисления параметров по полным динамическим характеристикам.

При описании дискретных систем используется z -преобразование. Оно получается дискретизацией известного преобразования Лапласа некоторой функции $f(t)$:

$$\Phi(p) = \int_0^{\infty} w(t) e^{-pt} dt \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} w(nT) \cdot z^{-n}, \quad (16)$$

где $z = e^{pT}$ - единичная задержка,

T - интервал дискретизации.

Если $w(t)$ - импульсная переходная характеристика (называемая также весовой функцией) некоторой динамической системы, то (p) - передаточная функция. Функция $w(nT)$ представляет собой последовательность дискретных отсчетов весовой функции.

Обобщая формулы (11) и (12) и подставив выражения синуса и косинуса через экспоненты, легко заметить, что переходная функция сейсмоприемника в общем случае состоит из двух комплексных экспонент:

$$h(t) = A \exp(-\beta \omega_0 + j \omega_1)t + B \exp(-\beta \omega_0 - j \omega_1)t. \quad (17)$$

Для нахождения параметров этих экспонент в дискретной форме воспользуемся методом моделирования последовательности отсчетов с помощью линейной комбинации экспоненциальных функций (иначе - метод Прони, метод линейного прогнозирования).

Функцию (15) для дискретного времени можно представить в виде

$$h_n = A z_1^n + B z_2^n$$

где A, B - амплитуда, в общем случае комплексная,

$$z_1 = \exp[(-\beta \omega_0 + j \omega_1)T],$$

$$z_2 = \exp[(-\beta \omega_0 - j \omega_1)T] \quad (19)$$

T - интервал дискретизации.

Функция (19) является решением однородного линейного разностного уравнения с постоянными коэффициентами:

$$h_n = -C_1 h_{n-1} - C_2 h_{n-2}, \quad (20)$$

где

$$C_1 = -(z_1 + z_2) = -2 \exp(-\beta \omega_0 T) \cos(\omega_1 T),$$

$$C_2 = z_1 \cdot z_2 = \exp(-2\beta \omega_0 T). \quad (21)$$

Таким образом, взяв значения переходной (или импульсной переходной) характеристики, зарегистри-

трированные экспериментально для ряда значений i и решая полученную систему условных уравнений вида (20) по методу наименьших квадратов, мы найдем константы C , C_1 , а из них по формулам (21) – собственную частоту и степень затухания. Интервал между отсчетами может быть равен интервалу дискретизации, однако постоустойчивость метода значительно возрастает, если вместо T использовать интервал, примерно равный $0.1/f_0$, где f_0 – собственная частота испытуемого сейсмоприемника.

Здесь упрощенно изложен используемый в стандарте метод линейного прогнозирования для двух комплексных экспонент. В общем виде метод обоснован в статье [12], а его использование в геофизике в [6].

При незатухающих колебаниях используется частный метод Прони, дающий возможность проводить гармонический анализ. Каждое значение сигнала представляется в виде

$$Z_i = X_k \sin(i\omega_k T) + Y_k \cos(i\omega_k T), \quad (22)$$

Решая систему уравнений (22), найдем коэффициенты X_k , Y_k , по которым определяются значения амплитуды k ой гармоники и ее фазы:

$$A_k = \sqrt{X_k^2 + Y_k^2}, \quad (23)$$

$$\phi_k = \arctg(Y_k / X_k).$$

Такой метод гармонического анализа по затратам машинного времени сопоставим с обычным преобразованием Фурье, но в отличие от него не требует, чтобы интервал вычислений был кратен периоду гармоники. Использование быстрого преобразования Фурье (БПФ) нецелесообразно. Во-первых, при испытаниях сейсмоприемников возникает необходимость выделения не более, чем 3 – 4 гармоник, так что затратами вычислительного времени можно пренебречь. Во-вторых, практическое использование БПФ показало возможность обогащения спектра высшими гармониками, что неприемлемо при измерении коэффициента нелинейных искажений (КНИ). Поэтому именно метод Прони рекомендован в стандарте для определения АЧХ и КНИ при использовании цифровой регистрации.

Описанные методы опробованы на моделях [9] и показали свою перспективность. Проведено и экспериментальное сравнение новых методов, включенных в стандарт, с известными и широко используемыми методами.

О методе определения собственной частоты по электромеханическому резонансу

На практике широко применяется известный метод определения собственной частоты сейсмоприемника по нулевому сдвигу фазы между питающим током и выходным напряжением (по электромеханическому резонансу). Обычно не учитывается, что он имеет методическую погрешность, но при разработке стандарта следовало оценить возможную ее величину.

В случае возбуждения сейсмоприемника синусоидальным электрическим током передаточная функция имеет вид (13). Методическая погрешность возникает за счет сдвига фазы на индуктивности катушки и является систематической, направленной всегда в сторону завышения значения частоты. Модельные исследования [9] и расчеты показали, что ее возможная величина 0,5 – 1 %. Следовательно, при ответственных испытаниях ею пренебрегать нельзя.

Об определении коэффициента нелинейных искажений электрическим возбуждением

Проведенный А. В. Рыжовым [13] анализ конструкции электродинамических сейсмоприемников и сведений об их нелинейности свидетельствует, что основную роль в возникновении нелинейных искажений играет нелинейное распределение магнитного поля. Поэтому имеет смысл особое внимание обратить на нелинейность коэффициента преобразования и демпфирования, напрямую зависящих от распределения магнитной индукции в зазоре.

При механическом возбуждении нелинейность магнитного поля проявится лишь в выходном преобразовании (3) и демпфировании.

Нелинейность магнитного поля при электрическом возбуждении действует двояко: во-первых, становится нелинейной вынуждающая сила, возникающая при взаимодействии электрического тока с нелинейным магнитным полем. Следовательно, появляется гармоника во входном сигнале. Во-вторых, действует, как и при механическом возбуждении, нелинейность на выходе и нелинейное демпфирование. Таким образом, измеренные значения нелинейности при электрическом и механическом возбуждении заведомо будут отличаться. Модельные исследования [9] показали, что эта разница может достигать десятков процентов. Кроме того, при вычислении коэффициента нелинейных искажений при электрическом возбуждении следует исключать падение напряжения на сопротивлении и индуктивности катушки, хотя на практике это часто не делается. Поэтому необходима разработка специальной методики определения нелинейности сейсмоприемников электрическим способом. Пока такая методика не разработана и не аттестована, нелинейность следует определять прямым методом на вибростенде, а значения КНИ, получаемые электрическим путем, принимать как оценочные.

О возможности учета нелинейных искажений вибростенда

В стандарте рекомендуется методически чистый способ определения КНИ при испытаниях сейсмоприемника на вибростенде с малыми нелинейными искажениями. Однако такие стенды существуют в единичных экземплярах. Между тем имеется возможность учета небольшой нелинейности стенда, сравнимой или в 2 – 3 раза превосходящей нелинейность самого сейсмоприемника.

Рассмотрим физическую картину работы сейсмоприемника на вибростенде. Пусть в сигнале стенда имеется некоторая высшая гармоника. Она поступает на сейсмоприемник, изменяется по амплитуде и фазе соответственно с его АЧХ и ФЧХ и поступает на выход (нелинейными искажениями высшей гармоники можно пренебречь). Одновременно на сейсмоприемник воздействует первая гармоника стенда. Нелинейность сейсмоприемника также вызывает появление высшей гармоники на выходе. Эти две составляющие векторно складываются, и на измерительный прибор поступает уже суммарная высшая гармоника. Если

1) измерить амплитуду и фазу гармоники стенда, учесть их изменение сейсмоприемником,

2) измерить амплитуду и фазу гармоники на выходе,

СЕЙСМОПРИЕМНИКИ: СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМЫ

то, производя векторное вычитание первой составляющей из суммарной гармоники, возможно выделить ту составляющую, которая обусловлена нелинейными свойствами только сейсмоприемника.

Амплитуду j -ой гармоники сигнала, генерируемой собственно сейсмоприемником, можно определить по формуле:

$$A_j = \sqrt{V_j^2 + B_j^2 - 2V_j B_j \cos(\varphi_j + \varphi_{sp} - \psi_j)} \quad (24)$$

где V_j и φ_j - значения амплитуды и фазы j -ой гармоники стэнда,

B_j и ψ_j - значения амплитуды и фазы j -ой гармоники выходного сигнала на клеммах сейсмоприемника,

φ_{sp} - сдвиг фазы сейсмоприемника на частоте j -ой гармоники по номинальной ФЧХ (8).

Эта рекомендация по определению поправок при измерениях КНИ, очевидно, носит временный характер. Необходимость в ней отпадет с появлением нового поколения стэндов с пренебрежимо малыми нелинейными искажениями.

частоты, определенных известным методом электромеханического резонанса [10] и методом использования АЧХ и ФЧХ, не имеющим методической погрешности (таблица 1).

Среднее отклонение составляет 0,5 %, что согласуется с приведенной выше теоретической оценкой.

Заметим, что такая методическая погрешность получается при степени затухания 0,3. Согласно [7], при степени затухания 0,5 методическая погрешность может достигнуть 0,8 % при собственной частоте 10 Гц и до 2 % - при более высокой собственной частоте.

Определение параметров группы сейсмоприемников с номинальной частотой 10 Гц и степенью затухания 0,5 - 0,6 по переходному процессу проведено при участии специалистов лаборатории инженерной геофизики. Запись переходного процесса проводилась на цифровой сеймостанции ЭХО-2. Период дискретизации устанавливался равным 1 мс, номинальная частота фильтра нижних частот (ФНЧ) 256 Гц. Продолжительность записи 1024 отсчета. Для каждого сейсмоприемника было записано по десять реализаций переходного процесса.

Таблица 1.

Значения собственной частоты, Гц, полученные разными методами

№№ сейсмо- приёмников	Метод определения частоты		Разность
	Резонансный	По АЧХ и ФЧХ	
1	10,01	9,96	0,05
2	10,03	9,98	0,05
3	10,01	9,92	0,09
4	9,86	9,81	0,05
5	9,98	9,90	0,08
6	9,88	9,82	0,06
7	9,91	9,87	0,04
8	9,99	9,94	0,05
9	9,98	9,96	0,02
10	9,95	9,92	0,03

О влиянии наклона на параметры сейсмоприемника

Наклон сейсмоприемника оказывает существенное влияние на коэффициент преобразования и на КНИ.

Причина влияния наклона на коэффициент преобразования очевидна: на сейсмоприемник действует составляющая по оси чувствительности, пропорциональная косинусу угла наклона.

Влияние наклона на КНИ обусловлено тем, что при наклоне изменяется составляющая силы тяжести, действующая по оси чувствительности. В результате происходит смещение груза относительно нормального положения. В [9] показано, что при этом в сейсмоприемнике происходит увеличение амплитуды высших гармоник, в основном второй, и соответственно возрастает КНИ.

3. Опробование методов испытаний, основанных на изучении полных динамических характеристик

Методы определения собственной частоты и степени затухания по АЧХ и ФЧХ и по переходному процессу были опробованы на практике.

Для группы сейсмоприемников с номинальной частотой 10 Гц и степенью затухания 0,3 проведено сравнение значений собственной

Среднее значение выходного сигнала определялось по участку, где переходный процесс можно было считать закончившимся. Величина шумовой составляющей, определенной на том же участке, примерно 1 % от амплитуды первого экстремума переходного процесса.

Значения параметров сейсмоприемников, полученные методом линейного прогнозирования, сравнивались со значениями, полученными по этому же переходному процессу известными методами: собственная частота по видимой частоте процесса (по точкам пересечения оси абсцисс), степени затухания - по отношению двух последовательных экстремумов. Полученные значения, осредненные по десяти реализациям, приведены в таблице 2.

Среднее квадратическое отклонение от среднего значения степени затухания для метода линейного прогнозирования 1,5 %, метода экстремумов 1,5 - 4 %, среднее квадратическое отклонение от среднего значения собственной частоты для метода линейного прогнозирования 0,5 %, для метода нулей переходного процесса 1,5 - 3 %.

Систематическая разница между методами составляет примерно 2 % для степени затухания и 0,7 % - для собственной частоты, что не превышает половины доверительного интервала при доверительной вероятности 0,9. Поэтому пока трудно сказать, существует ли систематическое расхождение двух методов или это влияние погрешностей измерений.

№№ сейсмо- приёмников	Степень затухания		Собственная частота	
	По методу линейного прогнозирования	По экстремумам переходного процесса	По методу линейного прогнозирования	По экстремумам переходного процесса
1	0,629	0,614	9,67	9,66
2	0,547	0,538	10,68	10,50
3	0,502	0,494	10,52	10,44
4	0,596	0,581	9,90	9,81
5	0,566	0,560	10,23	10,23

4. Разработка стандарта "Сейсмоприемники электродинамические. Основные показатели и методы испытаний"

На основе изложенных теоретических предположений, модельных исследований и практических измерений ВНИИГеофизикой разработан стандарт отрасли.

Для однозначного понимания стандарта в него включен раздел "Определения", в котором дано толкование наиболее важных терминов.

Приводится номенклатура показателей сейсмоприемников, включающая основные метрологические показатели, функции влияния, эксплуатационные и конструктивные показатели.

В перечень операций испытаний входят все операции, необходимые и достаточные для полного описания сейсмоприемника как средства измерений. Используемые средства испытаний включают общепромышленные приборы и испытательное оборудование и специализированные эталоны вибростенд и эталонные акселерометры, компьютер.

Изложенные в стандарте методы испытаний имеют две основные особенности:

1. В стандарте указывается, какова погрешность каждого метода и для каких конкретно испытаний данный метод рекомендуется. Точные, но сложные методы позволят применять стандарт при испытаниях для утверждения типа средства измерений и сертификационных испытаниях. В стандарт включены также относительно простые методы, которые могут быть использованы для контроля сейсмоприемников в сейсморазведочных партиях при эксплуатации.

2. Широко используется переходная характеристика сейсмоприемников. Изложены методы, позволяющие определить по ней основные параметры: собственную частоту, степень затухания, коэффициент преобразования. Для обработки рекомендуется упомянутый выше метод линейного прогнозирования.

Методика определения АЧХ и ФЧХ на вибростенде не имеет каких-либо особенностей, за исключением введения схемы измерений и обработки, основанной на автоматической регистрации показаний контрольного акселерометра и испытываемого сейсмоприемника.

В стандарте преимущество при измерениях отдается прямым методам с использованием виброизмерительных установок. В условиях метрологических лабораторий и полевых партий рекомендуется широко применять косвенные методы определения параметров (электрические). Особое место занимают методы, основанные на изучении переходных процессов при электрическом возбуждении. Они, не требуя сложных виброустановок, по сути близки к прямым методам: переходный процесс не зависит от того, каким образом задается импульс силы на подвижную часть сейсмоприемника механически или электрически. Исключением является определение коэффициента преобразования. Так как сейсмоприемник

производит электромеханическое преобразование, при электрическом возбуждении необходимо знать механическую величину массу груза.

Приводится номенклатура показателей сейсмоприемников, включающая основные метрологические показатели, функции влияния, эксплуатационные и конструктивные показатели.

Особо следует остановиться на определении коэффициента нелинейных искажений (КНИ). Как показано выше, необходимо создание специальной методики определения КНИ электрическим возбуждением. Поэтому настоящий стандарт рекомендует определение КНИ только при механическом воздействии на вибростенде с возможным учетом нелинейности последнего.

При наклоне сейсмоприемника изменяются коэффициент преобразования и КНИ. Теоретический расчет и практические исследования сейсмоприемников показывают, что критерий допускаемого угла наклона по КНИ более жесткий. Поэтому в стандарте допускаемый угол наклона определяется именно по достижению КНИ предельного значения.

Таким образом, разработан стандарт, использующий новые теоретические и экспериментальные разработки, пригодный для сертификации и для контроля сейсмоприемников в поле. Стандарт представлен в Министерство природных ресурсов РФ и мы надеемся, что он будет введен в действие законным порядком в первой половине 2003 г.

Литература

1. ГОСТ 4.378-85 СПКП. Сейсмоприемники электродинамические. Номенклатура показателей.
2. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений
3. ГОСТ 28134-89 Сейсмоприемники электродинамические. Типы, основные параметры и технические требования.
4. СТО ЕАГО 015-01-94 Геофизическая аппаратура и оборудование. Сейсмоприемники электродинамические. Параметры и характеристики.
5. СТО ЕАГО 016-01-94 Геофизическая аппаратура и оборудование. Сейсмоприемники электродинамические. Методы измерений основных параметров и характеристик.
6. В.В.Никифоров, А.В.Стакло. Анализ переходных процессов методом линейного прогнозирования. // Изм. техника. 1997. - №10. С. 11-13.
7. А.Е.Манохин. Погрешности электрических методов определения собственной частоты электродинамических сейсмоприемников. // Изм. техника. 1994. - № 7. - С. 37-41.
8. А.В.Рыков. Анализ развития теории сейсмоприемников // Геофизика. 1999. - № 5. С. 20-25.
9. А.В.Стакло, В.С.Симаков, С.А.Федотов. Математическое моделирование нелинейного сейсмоприемника // Разведка и охрана недр 2002. - № 3-4. С. 38-42.
10. А.И.Слуковский. Сейсморазведочная аппаратура. - М.: "Недра", 1970.
11. Р.Шерифф, Л.Гелларт. Сейсморазведка. - М.: "Мир", 1987.
12. S.M.Kay, J.R.Marple. Spectrum Analysis - A Modern Perspective. IEEE Trans., v. 69, № 11, nov.1981.
13. Пат. 2155358 (РФ). Электродинамический сейсмоприемник усоренный с наименьшим коэффициентом нелинейных искажений / А.В.Рыков. Опубл. 2000, Бюл. № 24.

СЕЙСМОПРИЕМНИКИ: СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ