



ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕЙМОПРИЁМНИКОВ

Стакло А.В., ФГУП ВНИИгеофизика, г. Москва

Сеймоприёмники являются первым и весьма важным звеном сейморазведочного канала. Искажения, внесённые ими в измеряемый сейсмический сигнал, практически невозможно исправить. Поэтому в специальной геофизической литературе теории сеймоприёмников и методам исследования их характеристик уделялось значительное внимание [5-10], при этом авторы использовали теоретические модели разной степени сложности.

Так как работа сеймоприёмника рассматривалась с разными целями и с различных точек зрения, то обычно авторы концентрировали внимание на частных проблемах. Отсутствует более или менее систематическое изложение всех основных вопросов теории и методов испытаний этих приборов. В настоящей статье сделана попытка обобщить основные результаты, полученные при теоретических исследованиях, с точки зрения использования их при экспериментальном определении параметров сеймоприёмников. Совершенно не затрагиваются особенности конструкции сеймоприёмников, так как излагаемые положения справедливы для всех применяемых приборов.

Сеймоприёмник с метрологической точки зрения является аналоговым измерительным преобразователем, на вход которого поступают механические колебания, а выходным сигналом является электрическое напряжение. Для сейморазведки важны и амплитуда измеряемого сигнала, и особенно фаза. Поэтому измеряемая физическая величина сейсмоколебание S представляется как комплексная величина, описываемая модулем a и фазой:

Приведём основные метрологические характеристики преобразователей согласно ГОСТ 8.009 [1] и отметим, каким образом эти характеристики нормируются ГОСТ 28134 [2]:

1. Номинальная функция преобразования. Величина коэффициента преобразования не нормируется. Приводится допуск на косвенную характеристику функции преобразования коэффициент нелинейных искажений (КНИ).

2. Пределы допускаемой основной погрешности. Нормируются отклонения коэффициента преобразования от номинального. Фазовая погрешность не нормируется.

3. Номинальная функция влияния и пределы допускаемых отклонений от номинальной функции. Нормируются показатели температурной зависимости коэффициентов преобразования и демпфирования; приводится область рабочих значений климатических параметров.

4. Номинальная полная динамическая характеристика и пределы допускаемых отклонений от неё. Эти показатели прямо не нормируются. Неявно предполагается, что сеймоприёмник динамическое звено второго порядка. Тогда его динамические характеристики полностью определяются нормированием номинальных значений коэффициента преобразования, собственной частоты и коэффициента демпфи-

вания (в ГОСТ 28134 используется термин "степень затухания"). Отклонения полной динамической характеристики от номинальной также полностью определяются отклонением от номинала значений указанных трёх параметров.

5. Номинальные частные динамические характеристики. Для сеймоприёмника это собственная частота и коэффициент демпфирования. Нормируются только отклонения этих параметров от номинала.

В проспектах часто указывается такая важная характеристика, как рабочая полоса частот. В ГОСТ 28134 такой параметр не приводится. На практике принято считать, что сеймоприёмник работает в полосе примерно $(0,525)j f_0$, где f_0 - собственная частота.

В ГОСТ 28134 допускаются следующие отклонения от номинала: коэффициента преобразования и собственной частоты в пределах 5 %, коэффициента демпфирования 10 %. Эта норма обеспечивает идентичность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сеймоприёмников с собственной частотой 10 Гц в пределах 0,5 дБ и различие фазового сдвига не более 1 мс в полосе частот от 5 до 250 Гц.

В метрологии нас интересуют не столько аналитические выражения для передаточных функций преобразователей, сколько конкретные числовые значения и графики. Поэтому желательно все формулы дать в компактной форме с ясным физическим смыслом. Для этого переменные величины будем представлять как функции оператора p . Хотя мы фактически будем иметь дело с изображениями, это уточнение в дальнейшем опустим, используя просто наименования функций: сила, ускорение, скорость и т. д.

Расчёты для иллюстрации материала проведены в основном для вертикального сеймоприёмника СВ1-10Ц, который для краткости назовём стандартным.

Основные теоретические построения справедливы как для вертикального, так и для горизонтального сеймоприёмника. В случаях, когда различия существенны, это будет отмечено особо.

1. Механическое возбуждение сеймоприёмника

Исследования сеймоприёмника на вибростенде, или, иначе говоря, при механическом возбуждении, наиболее близки к реальным условиям его работы. Рассмотрим полные динамические характеристики прибора по ГОСТ 8.009.

- 1) Уравнение движения груза (подвижной катушки) вертикального электродинамического сеймоприёмника.

Обозначим: x - смещение груза относительно корпуса, ξ - смещение корпуса сеймоприёмника относительно неподвижной системы координат. Направление осей x и ξ примем одинаковым (рисунок 1). Тогда смещение груза относительно неподвижной системы координат равно $x + \xi$, а полное ускорение соответственно $\ddot{x} + \ddot{\xi}$.

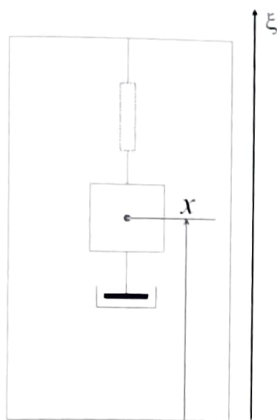


Рис. 1. Схема сейсмоприёмника.

На груз действуют сила упругости пружин, усилие демпфера, направленные в сторону, противоположную перемещению x , сила инерции, а также сила тяжести. Следовательно, уравнение движения катушки вертикального сейсмоприёмника имеет вид:

$$m(\ddot{x} + \ddot{\xi}) = -cx - b\dot{x} + mg$$

где m — масса катушки, b — коэффициент сопротивления, c — коэффициент жесткости, g — сила тяжести.

В вертикальных сейсмоприёмниках сила тяжести компенсируется начальным прогибом пружин, поэтому соответствующий член уравнения в большинстве случаев не учитывается. Однако при рассмотрении зависимости нелинейности сейсмоприёмника от наклона влияние силы тяжести необходимо иметь в виду.

В уравнении (1) фигурируют полные силы, действующие на катушку. Обычно в теории сейсмоприёмника делается переход к удельным силам, т. е. силам, отнесённым к единице массы. Так как удельная сила инерции численно равна ускорению, то далее используется этот привычный термин, а то, что фактически мы имеем дело с силой, проявится при изучении шунтирования сейсмоприёмника и при рассмотрении электрического возбуждения. После деления на m и очевидных преобразований запишем уравнение (1) в общепринятом виде:

$$\ddot{x} + 2\beta_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = -\ddot{\xi}, \quad (2)$$

где $\beta_0 = b/2\omega_0m$ — коэффициент демпфирования

(по ГОСТ 8.009),

$\omega_0 = \sqrt{c/m}$ — собственная частота (на практике используется также циклическая собственная частота $f_0 = \omega_0/2\pi$).

Для удобства дальнейших выкладок перепишем уравнение (2) в операторном виде:

$$(p^2 + 2\beta_0\omega_0p + \omega_0^2)X(p) = -p^2 \cdot \Xi(p). \quad (3)$$

Сейсмоприёмник является двойным преобразователем: по формуле (2) сила инерции преобразуется в смещение катушки относительно корпуса, а затем в электрическое напряжение E , пропорциональное скорости этого смещения:

$$E(p) = K \cdot pX(p), \quad (4)$$

где K — коэффициент преобразования.

2) Передаточную функцию сейсмоприёмника можно рассматривать, принимая за входной сигнал ускорение или скорость, смещения корпуса. Выходной сигнал всегда электрическое напряжение. В режиме холостого хода с учётом (3, 4) передаточная функция примет вид:

входной сигнал — ускорение:

$$U(p) = \frac{-K \cdot p}{p^2 + 2\beta_0\omega_0p + \omega_0^2}; \quad (5)$$

входной сигнал — скорость:

$$V(p) = \frac{-K \cdot p^2}{p^2 + 2\beta_0\omega_0p + \omega_0^2}. \quad (6)$$

Эти выражения описывают известное из теории автоматического регулирования [11] колебательное звено, если $\beta_0 < 1$, или апериодическое звено 2-го порядка, если $\beta_0 \geq 1$.

Выше при выводе всех соотношений предполагалось, что измеряемое ускорение ξ действует по оси чувствительности прибора. В случае наклона сейсмоприёмника на него будет ξ действовать проекция ускорения на ось чувствительности:

$$\xi_a = \xi \cdot \cos \alpha \approx \xi \cdot \left(1 - \frac{\alpha^2}{2}\right),$$

что можно трактовать как уменьшение коэффициента преобразования примерно по параболическому закону.

3) Амплитудно-фазовая характеристика, соответствующая (5)

$$U(j\omega) = A(\omega) \exp[j\varphi(\omega)], \quad (7)$$

где $A(\omega)$ — АЧХ и $\varphi(\omega)$ — ФЧХ имеют вид:

$$A(\omega) = \frac{K\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega_0^2\omega^2}}; \quad (8)$$

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

Нормированная по коэффициенту преобразования АЧХ:

$$A_N(\omega) = \frac{\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega_0^2\omega^2}}, \quad (9)$$

4) Переходная характеристика:

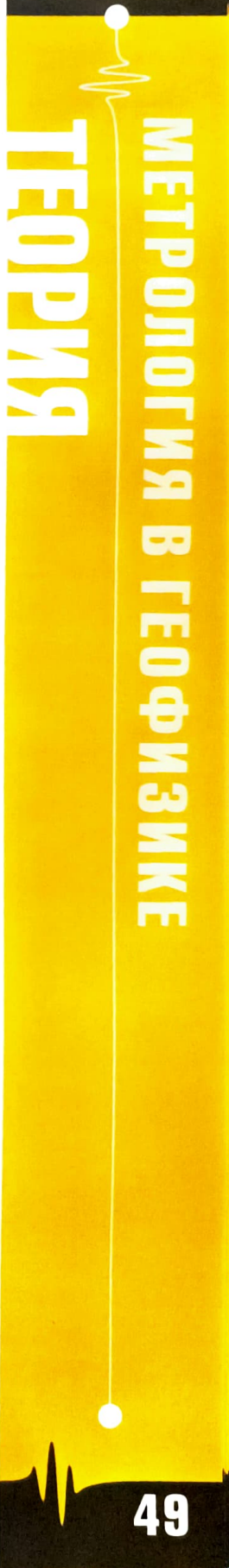
$$h(t) = \frac{K \cdot \omega_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \exp(-\beta\omega_0 t) \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t \quad (10)$$

5) Импульсная переходная характеристика:

$$g(t) = K \exp(-\beta\omega_0 t) [\cos \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t - \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t]. \quad (11)$$

Если рассматривать в качестве входной величины скорость (6), то АЧХ и ФЧХ примут вид:

$$A(\omega) = \frac{K\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega_0^2\omega^2}};$$





$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\beta\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (12)$$

На практике удобно пользоваться АЧХ, построенной в двойном логарифмическом масштабе (ЛАЧХ). ЛАЧХ сейсмоприёмника при любом коэффициенте демпфирования имеет две асимптоты, пересекающиеся на сопрягающей частоте, равной ω_0 .

В случае апериодического режима можно для наглядности представить знаменатель функций (5-6) в виде $(p + \omega_1)(p + \omega_2)$. Значения частот ω_1, ω_2 определяются из равенств: $\omega_1\omega_2 = \omega_0^2$, $\omega_1 + \omega_2 = 2\beta\omega_0$.

Рассмотрим нормированную ЛАЧХ для передаточной функции (5) в зависимости от величины коэффициента демпфирования (рис. 2). При значительном демпфировании ($\beta \gg 1$) на характеристике появляется участок, примерно параллельный оси абсцисс и характерный для акселерометров. Граничными частотами этого участка служат частоты ω_1, ω_2 . Для графиков на рисунке принято: $f_0 = 10$ Гц, $\beta = 0,3; 0,7; 10$. При коэффициенте демпфирования $\beta = 10$ граничные частоты области, в которой сейсмоприёмник работает как акселерометр, примерно равны 0,5 и 200 Гц.

Особый интерес представляет сейсмоприёмник с коэффициентом демпфирования $\beta = \sqrt{2}/2 \approx 0,707$. Квадрат частотной характеристики для него имеет вид: $A(\omega)^2 = \omega^2 / (\omega^2 + \omega_0^2)$.

Таким образом, в этом случае прибор имеет свойства фильтра Баттерворта. Значение частотной характеристики сейсмоприёмника на частоте среза ω_0 , как и у фильтра Баттерворта, равно минус 3 дБ.

Обычно механическое демпфирование сейсмоприёмника невелико и для увеличения демпфирования применяют проводящий каркас катушки, а также шунтирование. Катушку сейсмоприёмника с сигнальной обмоткой и проводящим каркасом можно рассматривать как трансформатор, а в теории трансформаторов для упрощения анализа производится пересчёт параметров вторичной обмотки в первичную. Далее предполагается, что этот пересчёт сделан, и под термином, например, "сопротивление каркаса" понимается именно пересчитанное в сигнальную обмотку сопротивление. Считая, что магнитный поток полностью охватывает и сигнальную обмотку, и каркас, а магнитным рассеянием можно пренебречь, придём к выводу, что индуктивность обеих обмоток одинакова.

При движении катушки в магнитном поле индуцируется ЭДС как в сигнальной обмотке, так и в каркасе. В каркасе под действием наведённой ЭДС, пропорциональной скорости смещения,

$$E(p) = K \cdot pX(p), \quad (13)$$

будет протекать ток

$$I_2(p) = \frac{E(p)}{Z_2(p)}, \quad (14)$$

где $Z_2(p) = r_2 + pL$ - комплексное сопротивление каркаса.

Ток в каркасе вызовет появление дополнительной силы, противодействующей движению катушки. Данную силу приведём к единичной массе, как это делалось и при выводе уравнения (2):

$$F(p) = \frac{K \cdot I_2(p)}{m} = \frac{K^2}{m \cdot Z_2(p)} pX(p), \quad (15)$$

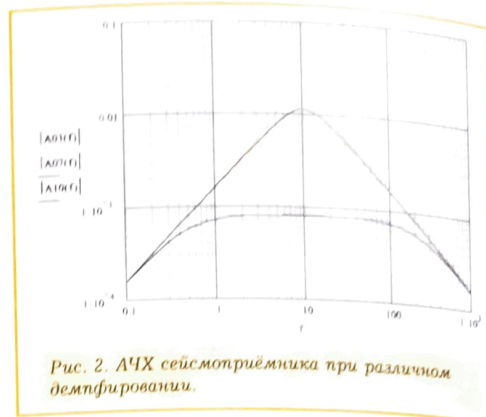


Рис. 2. АЧХ сейсмоприёмника при различном демпфировании.

Действие этой силы мы можем представить как отрицательную обратную связь. Из теории автоматического регулирования [11] известно: если система с передаточной функцией $\Phi_1(p)$ замкнута отрицательной обратной связью с передаточной функцией $\Phi_2(p)$, то результирующая передаточная функция будет иметь вид

$$\Phi(p) = \frac{\Phi_1(p)}{1 + \Phi_1(p) \cdot \Phi_2(p)} \quad (16)$$

Выходной сигнал при $R_{sh} = \infty$ (рисунок 3)

$$E_1(p) = \frac{r_2}{r_2 + pL} E(p) = E(p) \cdot \frac{1}{1 + \tau_2 p} \quad (17)$$

где $\tau_2 = \frac{r_2}{L}$ - постоянная времени каркаса.

Из (15, 16, 17) передаточная функция сейсмоприёмника с проводящим каркасом:

$$U_2(p) = \frac{U(p)}{1 + k_2(p) \cdot U(p)} \cdot \frac{1}{1 + \tau_2 p} \quad (18)$$

где $k_2(p) = \frac{K^2}{m \cdot Z_2(p)}$ - коэффициент обратной

связи.

Отметим, что формула (18) описывает систему третьего порядка, в отличие от (5).

Так как сила, возникающая при отрицательной обратной связи, пропорциональна скорости смещения катушки, то дополнительные затраты энергии на преодоление активной составляющей этой силы эквивалентны увеличению демпфирования. Рассматривая (2) и (15), нетрудно заключить, что коэффициент демпфирования возрастёт на величину

$$\Delta\beta = \frac{K^2}{2\omega_0 m \cdot r_2} \quad (19)$$

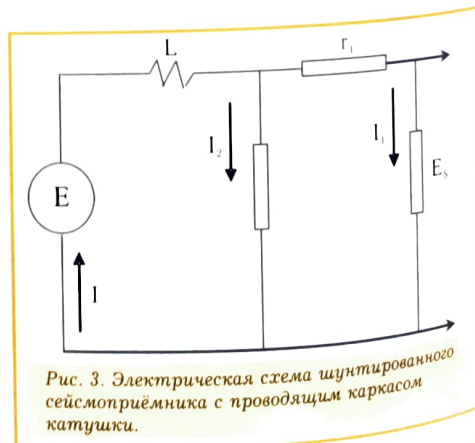


Рис. 3. Электрическая схема шунтированного сейсмоприёмника с проводящим каркасом катушки.

Очевидно, что сопротивление каркаса непосредственно измерить невозможно. Впрочем, в обычной геофизической практике это и не нужно, как не нужно, вообще говоря, знать, какая часть демпфирования механического, а какая электромагнитного происхождения.

Совершенно аналогичное влияние оказывает ток в сигнальной обмотке при шунтировании сейсмоприёмника. Так же возникнет отрицательная обратная связь, так же возрастёт коэффициент демпфирования. Поэтому, рассматривая напряжение на сопротивлении шунта (рис. 3), мы сразу можем написать передаточную функцию шунтированного сейсмоприёмника с проводящим каркасом.

$$U_{12}(p) = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + r_1} \cdot \frac{U(p)}{1 + k_{12}(p) \cdot U(p)} \cdot \frac{1}{1 + \tau_{12} p} \quad (20)$$

где $k_{12}(p) = \frac{K^2 p}{Z_{12}(p) \cdot m}$ - коэффициент обратной

связи, $\tau_{12} = \frac{R_{12}}{L}$,

$Z_{12}(p) = R_{12} + pL$ - суммарное комплексное сопротивление

$R_{12} = \frac{(R_{sh} + r_1) \cdot r_2}{(R_{sh} + r_1) + r_2}$, L индуктивность, RSH,

r_1 , r_2 - соответственно сопротивление шунта, обмотки и каркаса.

Коэффициент демпфирования возрастёт на величину

$$\Delta\beta = \frac{K^2}{2\omega_0 m \cdot R_{12}} \quad (21)$$

Численные оценки для стандартного сейсмоприёмника показывают, что вклад механического затухания в суммарный коэффициент демпфирования составляет примерно 20 %; вклад шунта и проводящего каркаса ориентировочно по 40 %.

В популярном у геофизиков виде, когда в качестве входной величины принимается скорость, передаточная функция сейсмоприёмника с шунтом и проводящим каркасом, очевидно,

$$V_{12}(p) = pU_{12}(p), \quad (22)$$

Посмотрим, нельзя ли аппроксимировать передаточную функцию (22) более простой, подобной (6), только с изменёнными коэффициентами преобразования и демпфирования:

$$K_a = K \cdot \frac{R_{sh}}{R_{sh} + r_1}, \quad \beta_a = \beta_0 + \frac{K^2}{2\omega_0 m \cdot R_{12}}, \quad (23)$$

На рис. 4 приведены АЧХ и ФЧХ, рассчитанные по точной формуле (22) и по упрощённой (показана пунктиром). Отличие АЧХ на частоте 500 Гц составит не более 0,5 дБ, отличие ФЧХ в единицах времени не более 0,1 мс. Таким образом, испытываемый сейсмоприёмник в рабочей полосе частот может рассматриваться как "чёрный ящик", представляющий собой систему второго порядка, без анализа, шунтирован он или нет, какой принцип демпфирования заложен в конструкции и т.д.

Передаточная функция или амплитудно-фазовая характеристика полностью описывают динамические свойства любой динамической системы. Но нередко на практике требуется

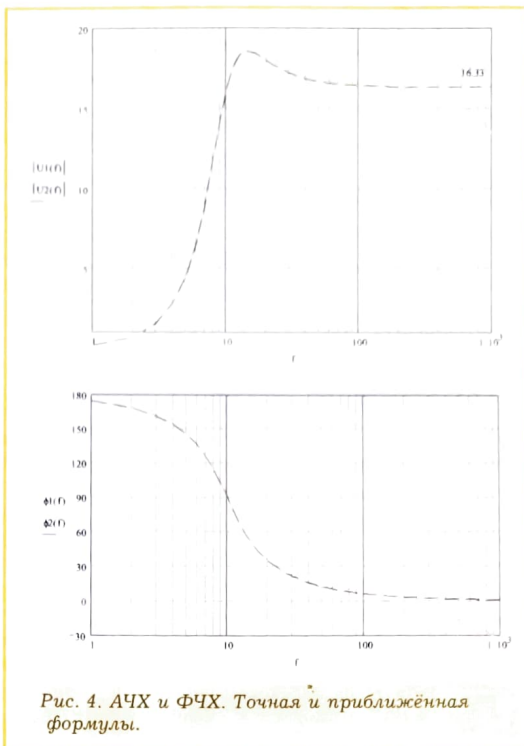


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ. Точная и приближённая формулы.

определить и частные параметры: коэффициент преобразования, собственную частоту и коэффициент демпфирования.

Рассмотрим простую модель по передаточной функции (6) и соответствующие АЧХ и ФЧХ (12). Коэффициент преобразования можно определить как значение АЧХ на достаточно высокой частоте, порядка $(10 \div 15)f_0$.

После определения коэффициента преобразования K найдём нормированную амплитудно-фазовую характеристику:

$$V_N(j\omega) = \omega^2 \cdot (\omega_0^2 - \omega^2 + j \cdot 2\beta_0 \omega_0 \omega)^{-1} \quad (24)$$

Но, с другой стороны, АФХ может быть выражена также через нормированную АЧХ и ФЧХ:

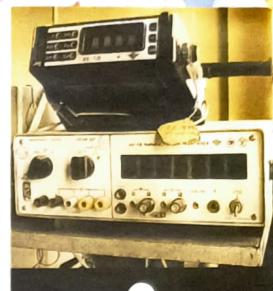
$$V_N(j\omega) = A_N(\omega) \cos(\varphi(\omega)) + j \cdot A_N \sin(\varphi(\omega)), \quad (25)$$

Приравняв действительные и мнимые части (24) и (25), получим два уравнения, из которых находим ω_0 и β_0 :

$$\omega_0^2 = \omega^2 \left[1 + \frac{\cos \varphi(\omega)}{A_N(\omega)} \right], \quad \beta = - \frac{\sin \varphi(\omega)}{2\omega_0 \cdot A_N(\omega)} \quad (26)$$

Для повышения точности следует провести вычисления для всех значений частоты, при которых определены АЧХ и ФЧХ. Практически достаточно выполнить измерения в полосе от $0,5f_0$ до $2,5f_0$. Исследования на вибростенде группы из 10 сейсмоприёмников показали, что при погрешности определения АЧХ не более 3 % и ФЧХ не более 30° средняя квадратическая погрешность определения собственной частоты данным методом составляет 0,3 %, коэффициента демпфирования 1,5 %.

Рассмотренная выше аппроксимация передаточной функции третьего порядка функцией второго порядка неизбежно приведёт к тому, что при использовании упрощённых формул для АЧХ и ФЧХ коэффициент демпфирования и





собственная частота указанным способом будут определяться с некоторой методической погрешностью. Но, как показывают расчёты, систематическая погрешность вычисления частоты не превышает 0,05 %, коэффициента демпфирования 0,4 %. Эти погрешности существенно меньше погрешностей, возникающих из-за неточности определения АФХ, поэтому и при определении частных параметров вполне возможно использование простой модели сейсмоприёмника.

1. Электрическое возбуждение сейсмоприёмника

Под электрическим возбуждением понимается воздействие непосредственно на подвижную катушку сейсмоприёмника силы, возникающей при прохождении через сигнальную обмотку переменного электрического тока J :

$$F = \frac{K \cdot J}{m} \quad (27)$$

В формуле (27) учтено, что сила относится к единице массы, т. е. используется, как и ранее, удельная сила.

В качестве выходного сигнала измеряется электрическое напряжение на выводах сейсмоприёмника.

Рассмотрим два вида возбуждающего тока: импульсный, в виде единичной ступени и синусоидальный. Соответственно будут возбуждаться собственные или вынужденные колебания. Отметим, что испытания электрическими методами допустимо проводить без демонтажа сейсморазведочной системы, непосредственно на рабочем месте, в полевых условиях.

С метрологическими целями переходные характеристики сейсмоприёмника определяются только с использованием электрического возбуждения. После окончания электрического импульса катушка совершает свободные колебания, и выходной сигнал ничем не отличается от того, каким он был бы в случае механического возбуждения.

При возбуждении сейсмоприёмника электрическим сигналом в виде ступени на выходе индуцируется напряжение, пропорциональное скорости смещения катушки:

$$u(t) = \frac{K^2 J}{\omega_0 m \sqrt{1 - \beta^2}} \cdot \exp(-\beta \omega_0 t) \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 t \quad (28)$$

Запись переходного процесса даёт возможность определить частные параметры сейсмоприёмника. Наибольшее распространение получили методы, основанные на использовании отдельных характерных точек переходного процесса.

По экстремумам переходного процесса при $\beta < 1$ определяют коэффициент демпфирования:

$$\beta = \frac{L}{\sqrt{\pi^2 + L^2}} \quad (29)$$

где L - натуральный логарифм отношения двух последовательных экстремумов переходного процесса.

По интервалу времени между нулевыми значениями переходной функции находят кажущуюся частоту

$$f_{app} = f_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (30)$$

откуда находится истинная частота сейсмоприёмника f_0 .

Методы характерных точек удобны при оперативной регистрации переходного процесса на электронном осциллографе. На них же обычно основаны тестеры для определения параметров сейсмоприёмников.

При цифровой регистрации целесообразно применять метод линейного прогнозирования [14, 16], который позволяет использовать не отдельные, а все точки переходного процесса. Используя понятие z -преобразования [15], нетрудно найти, что дискретная передаточная функция для сейсмоприёмника с импульсной переходной характеристикой (11) имеет вид:

$$H(z) = \frac{2T(1 - z^{-1})K}{1 - 2\exp(-\beta_0 \omega_0 T) \cos(\omega_0 \sqrt{1 - \beta_0^2}) z^{-1} + \exp(-2\beta_0 \omega_0 T) z^{-2}} \quad (31)$$

При дискретизации сигнала дифференциальное уравнение переходит в разностное [11, 25]. Соответствующее функции (31) однородное разностное уравнение

$$x(nT) = C_1 x(nT - T) + C_2 x(nT - 2T) \quad (32)$$

$$\text{где } C_1 = -2\exp(-\beta_0 \omega_0 T) \cos(\omega_0 \sqrt{1 - \beta_0^2})$$

$$C_2 = \exp(-2\beta_0 \omega_0 T).$$

Таким образом, значение некоторого отсчёта по (32) получается в виде линейной комбинации двух предшествующих отсчётов. Составив систему уравнений вида (32) для множества цифровых отсчётов переходного процесса и решая её по методу наименьших квадратов, мы можем найти значения C_1 , C_2 и вычислить по ним два неизвестных параметра: ω_0 и β_0 .

При цифровой регистрации следует учитывать, что в начальный момент на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) будет действовать напряжение, равное $J \cdot R_{вх}$, где $R_{вх}$ - активное входное сопротивление сейсмоприёмника. Поэтому на переходный процесс собственно сейсмоприёмника будет наложен переходный процесс фильтра АЦП. Например, если этот фильтр имеет частоту среза 500 Гц, то для расчёта следует брать значения переходного процесса не ранее, чем через 5 - 10 мс после выключения тока. При этом должны быть отключены все другие возможные в системе регистрации фильтры: ФВЧ, ФНЧ, режекторные и т.д.

По сравнению с методом характерных точек метод линейного прогнозирования является более устойчивым к шуму и к случайным погрешностям отсчётов. Исследования показали, что погрешности значений собственной частоты, определённых методом характерных точек и методом линейного прогнозирования составляет соответственно 1,5 % и 0,5 %, а значений коэффициента демпфирования 3 % и 1,5 %.

При гармоническом входном токе J на катушку действует синусоидальная электромагнитная сила:

$$F = \frac{K \cdot J_0}{m} \sin(\omega t) \quad (33)$$

В этом случае выходное напряжение

$$V_E(p) = \left[\frac{K}{m} \cdot U(p) + r_1 + pL \right] \cdot J(p) \quad (34)$$

Здесь $U(p)$ – передаточная функция нешунтированного сейсмоприёмника

Обозначив комплексное сопротивление обмотки $r_1 + pL = Z_0(p)$, получим следующую передаточную функцию для нешунтированного сейсмоприёмника без проводящего каркаса

$$W(p) = Z_0(p) + \frac{K}{m} U(p) \quad (35)$$

Рассмотрим теперь влияние проводящего каркаса катушки и индуктивных связей между каркасом и сигнальной обмоткой.

Ток в сигнальной обмотке наведёт в каркасе ЭДС $e = J \cdot pL$. Ток в каркасе, равный $i_2 = e/Z_2$, где $Z_2 = r_2 + pL$, индуцирует противоЭДС в сигнальной обмотке $-i_2 \cdot pL = -J \cdot p^2 L^2 / Z_2$.

Следовательно, к сопротивлению сигнальной обмотки Z_0 прибавляется вносимое сопротивление $-p^2 L^2 / Z_2$.

Сила, действующая на катушку и вызывающая смещение $X(p)$, пропорциональна сумме тока возбуждения и тока в каркасе:

$$F(p) = K[J(p) + i_2(p)] = K \cdot J(p) \cdot \left(1 - \frac{L \cdot p}{Z_2(p)}\right) = \frac{K \cdot J(p)}{1 + \tau_2 \cdot p} \quad (36)$$

где $\tau_2 = L/r_2$

Ток в каркасе определяется из уравнения

$$i_2(p)R_2 + p \cdot L \cdot i_2(p) = K \cdot p \cdot X(p) \quad (37)$$

откуда

$$i_2(p) = \frac{K \cdot p \cdot X(p)}{Z_2(p)} \quad (38)$$

Уравнение движения катушки, аналогичное (2), сразу представим в привычных обозначениях:

$$\left(p^2 + 2\beta_0 \omega_0 p + \omega_0^2 + \frac{K^2 \cdot p}{m \cdot Z_2(p)}\right) \cdot X(p) = \frac{K \cdot J(p)}{m} \cdot \frac{1}{1 + \tau_2 p} \quad (39)$$

Смещение катушки

$$X(p) = \frac{J(p)}{m} \cdot \frac{K}{\left(p^2 + 2\beta_0 \omega_0 p + \omega_0^2 + \frac{K^2 \cdot p}{m \cdot Z_2(p)}\right) \cdot (1 + \tau_2 p)}$$

Второй сомножитель представляет собой передаточную функцию $U_2(p)$ нешунтированного сейсмоприёмника с проводящим каркасом (18). Следовательно,

$$X(p) = \frac{J(p)}{m} \cdot U_2(p) \quad (41)$$

Напряжение, возникающее в сигнальной обмотке из-за движения катушки, складывается из напряжения в самой сигнальной обмотке и противодействующего напряжения, индуцируемого током в каркасе:

$$V_s(p) = K \cdot p \cdot X(p) \cdot \left(1 - \frac{p \cdot L}{Z_2(p)}\right) = \frac{K \cdot p \cdot X(p)}{1 + \tau_2 \cdot p} = Z(p) \cdot J$$

где $Z(p)$ – вносимое движением катушки сопротивление

$$Z(p) = \frac{K}{m} U_2(p) \cdot \frac{1}{(1 + \tau_2 \cdot p)} \quad (43)$$

Полученное дополнительное сопротивление просуммируем с электрическим. Окончательное выражение для электромеханического сопротивления $W(p)$ нешунтированного сейсмоприёмника с проводящим каркасом

$$W(p) = Z_0(p) - \frac{L^2 p^2}{Z_2(p)} + \frac{K}{m} U_2(p) \cdot \frac{1}{(1 + \tau_2 \cdot p)} \quad (44)$$

Так же, как и (35), выражение (44) включает две составляющие. Отличие в том, что к импедансу обмотки добавлено вносимое сопротивление каркаса, а импеданс собственно преобразовательного блока изменён из-за влияния тока в каркасе. Однако влияние этих составляющих невелико и проявляется только на высоких частотах.

На рис. 5 приведены соответствующие АЧХ и ФЧХ с учётом индуктивных связей (показана пунктиром) и без него. В двух точках значение ФЧХ, равно нулю, т. е. имеют место два электро-механических резонанса. Обычно частоту первого резонанса принимают за собственную частоту сейсмоприёмника, однако это справедливо только в том случае, если механическое затухание сейсмоприёмника равно нулю. Коэффициент механического демпфирования стандартного сейсмоприёмника, как показывает расчёт, составляет примерно 0,1. В этом случае частота первого электромеханического резонанса отличается от собственной частоты сейсмоприёмника, но это отличие не более чем 0,5 %.

Передаточная функция шунтированного сейсмоприёмника для случая электрического возбуждения находится как для параллельного соединения двух сопротивлений:

$$W_{sh}(p) = \frac{W(p) \cdot R_{sh}}{W(p) + R_{sh}} \quad (45)$$

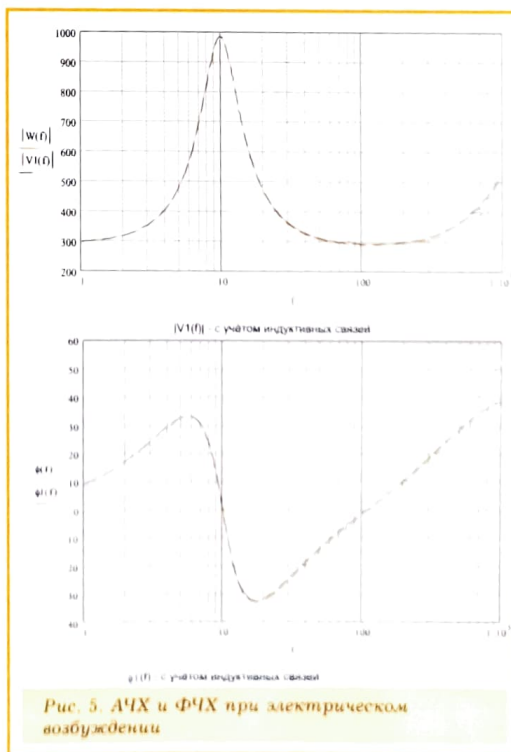


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ при электрическом возбуждении



И в (35), и в (44) ятром являются соответствующие преобразованные функции сейсмоприёмника при механическом возбуждении. Это означает, что по электрическим АЧХ и ФЧХ мы можем определить требуемые параметры сейсмоприёмника, правда, с одной оговоркой. Так как в сейсмоприёмнике происходит электромеханическое преобразование, то для определения коэффициента преобразования необходимо знать какую-либо механическую величину, например, массу катушки. Однако на практике масса катушки для конкретного прибора из-за технологического разброса известна с невысокой точностью, примерно 2–3 %. Поэтому определение коэффициента преобразования электрическим способом применимо в тех случаях, когда такая погрешность этого параметра допустима.

При использовании электрического метода для определения коэффициента нелинейных искажений (КНИ) измеряемая первая гармоника выходного напряжения является суммой сигнала собственно электромеханического преобразователя и падения напряжения на сопротивлении и индуктивности катушки. Естественно, что при расчёте КНИ следует учитывать только первую составляющую. Для исключения ненужной составляющей возможно использовать достаточно сложную методику, подобную предложенной в [13]. Но значительно проще сделать это расчётным путём на базе формул (44, 45).

Выше рассматривалось возбуждение сейсмоприёмника заданным электрическим током. Практически же при испытаниях используются генераторы гармонического напряжения и балластное сопротивление. Расчёты показывают, что возникающей при этом фазовой погрешностью можно пренебречь. Максимальная погрешность АЧХ шунтированного сейсмоприёмника отмечается на собственной частоте и составляет 1,5 %, если балластное сопротивление превосходит собственное сопротивление обмотки в 100 раз. Таким образом, для рассматриваемого стандартного сейсмоприёмника вполне достаточно брать балластное сопротивление порядка 30 кОм.

3. Нелинейность сейсмоприёмника

При сейсморазведочных работах имеют место интенсивные низкочастотные помехи, в десятки и сотни раз превосходящие полезный сигнал. Если сейсмоприёмник имеет существенную нелинейность, то возникают высшие гармоники, попадающие в тот же частотный диапазон, что и полезный сигнал. Поэтому большое значение имеет изучение нелинейных искажений в сейсмоприёмнике, которые могут рассматриваться как разновидность погрешностей прибора.

Определение коэффициента нелинейных искажений (КНИ) с требуемой геофизиками точностью – сложная измерительная задача. Наиболее предпочтительным является прямой метод с использованием высоколинейного вибростенда. К сожалению, такие вибростенды существуют в единичных экземплярах и не всегда доступны потребителю. Возможны два решения проблемы. Первое – оценить нелинейность стенда с помощью эталонных акселерометров с пренебрежимо малой нелинейностью и ввести соответствующие поправки в результаты измерений КНИ сейсмоприёмника. Это вполне возможно, если измерять не только амплитуду гармоник стенда и гармоник на выходе сейсмоприёмника,

но и их фазы [17]. Второе – разработать методику определения КНИ электрическим способом. Генераторы гармонического электрического напряжения с низким коэффициентом гармоник имеются, но здесь возникает другая трудность.

При электрическом возбуждении происходит тройное преобразование: входной ток преобразуется в силу, действующую на катушку, далее сила преобразуется в смещение катушки, а скорость смещения – в электрическое напряжение. Нелинейные искажения могут возникать на любой из трех ступеней преобразования, в то время как нелинейность собственно сейсмоприёмника возникает только на последних двух ступенях. Но исключение нелинейности возбуждающей силы достаточно сложно, а пренебрежение указанным обстоятельством может привести к существенным погрешностям определения КНИ. Кроме того, как уже упоминалось выше, при вычислении коэффициента нелинейных искажений при электрическом возбуждении следует тем или иным способом исключить напряжение на индуктивном сопротивлении катушки, и амплитуду гармоник относить к первой гармонике сигнала, вырабатываемого преобразовательным блоком сейсмоприёмника. В противном случае получаемая оценка КНИ будет существенно заниженной.

В соответствии с ГОСТ 28134 при измерении нелинейности амплитуда скорости движения катушки относительно корпуса должна быть постоянной 0,01 м/с, независимо от коэффициента демпфирования. Необходимо указанную амплитуду выдерживать и при механическом, и при электрическом возбуждении. Частота, при которой измеряются нелинейные искажения, должна равняться номинальной собственной частоте сейсмоприёмника.

Следует обратить внимание и на метод гармонического анализа, так как не все он пригодны для исследования нелинейности сейсмоприёмников. Особенностью решаемой задачи является весьма малая амплитуда гармоник КНИ современного сейсмоприёмника, согласно ГОСТ 28134, не должен быть более 0,2 %. Обычное преобразование Фурье (ОПФ) может быть проведено с необходимой точностью, но при этом необходимо, чтобы интервал, на котором проводятся вычисления, был точно кратен периоду первой гармоник, иначе возникают существенные искажения. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) обычно оперирует с массивами, содержащими 2N отсчётов. Ограничения на длину массива, накладываемые как ОПФ, так и БПФ, не всегда удобны. Кроме того, как показывает практика, БПФ может обогащать спектр высокочастотными компонентами, что при определении нелинейности сейсмоприёмника совершенно недопустимо.

Для гармонического анализа выходного сигнала нелинейного сейсмоприёмника рекомендуется частный метод Пронни [16]. Этот метод лишён указанных выше недостатков и позволяет определить амплитуду и фазу гармоник с высокой точностью.

Суть метода заключается в следующем. Каждый отсчёт выходного сигнала сейсмоприёмника или его модели Z_j представляют в виде

$$Z_j = X \sin(2\pi f \cdot j\Delta t) + Y \cos(2\pi f \cdot j\Delta t), \quad (46)$$

где f – частота сигнала,
 Δt – интервал между отсчётами.

Решая по МНК систему условных уравнений (42), находят коэффициенты X , Y , по которым определяются значения амплитуды синусоиды и ее фазы:

$$A = \sqrt{(X^2 + Y^2)}, \quad \varphi = \arctg(Y/X). \quad (47)$$

Исследования данного метода показали его высокую устойчивость к случайным помехам. Метод работает в широком интервале частоты дискретизации, при произвольном соотношении длины массива и периода исследуемого сигнала.

Экспериментальные исследования сейсмоприемников показали, что определяющую роль при этом играет вторая гармоника, хотя в некоторых случаях заметной является и третья гармоника. Превалирование второй гармоники объясняется просто. Пусть, например, характеристика нелинейности имеет вид некоторой нечётной функции смещения катушки x :

$$p(x) = 1 + \alpha \cdot x^3$$

Естественно, в выходном сигнале будет иметься только третья гармоника. Но при наличии постоянного смещения катушки x_0

$$p(x) = 1 + \alpha(x + x_0)^3 = 1 + \alpha(x^3 + 3x^2x_0 + 3xx_0^2 + x_0^3)$$

появляется слагаемое $3\alpha x^2x_0$, определяющее вторую гармонику.

По ГОСТ 28134 амплитуда скорости катушки относительно магнита при определении КНИ должна составлять 0,01 м/с, следовательно, амплитуда перемещения катушки сейсмоприемника на собственной частоте 10 Гц составит 0,16 мм.

Нетрудно рассчитать, что начальная деформация пружины стандартного вертикального сейсмоприёмника составляет 2,5 мм. Согласно ГОСТ 28134, отклонения собственной частоты могут достигать 5 %. Это значит, что начальная деформация пружины может изменяться от прибора к прибору на 10 %, т. е. до 0,25 мм, что в полтора раза превышает амплитуду колебаний при определении нелинейности. А это, в свою очередь, означает, что вполне вероятно децентровка катушки, а значит, и появление второй гармоники значительной величины.

Децентровка катушки происходит и под влиянием наклона прибора, когда на прибор начинает действовать не полное значение силы тяжести, а её проекция на ось чувствительности. Децентровка катушки у вертикального сейсмоприёмника будет изменяться примерно пропорционально квадрату угла наклона, следовательно, малые наклоны не окажут существенного влияния на нелинейность. Децентровка, при которой вторая гармоника становится преобладающей, будет достигнута при угле наклона 15° 20'.

Если первоначально децентровка была равна нулю, то при наклоне КНИ будет возрастать, причём, как показано выше, в основном за счет увеличения амплитуды второй гармоники. Если же у некоторых приборов катушка при наклоне, равном нулю, слегка опущена, то при определённом значении угла наклона она займёт оптимальное положение. Следовательно,

в этом случае при наклоне сейсмоприёмника сначала должно наблюдаться не увеличение, а уменьшение КНИ и лишь при дальнейшем увеличении наклона КНИ начнёт возрастать. Действительно, при испытаниях некоторых приборов зависимость КНИ от наклона носит такой характер (рисунок 6), что служит серьёзным обоснованием правильности приведённых рассуждений.

Работы А.В. Рыжова [18] позволяют сделать вывод, что нелинейность сейсмоприёмника в основном является следствием нелинейности магнитного поля. А если это так, то при электрическом возбуждении за счёт нелинейности действующей на катушку силы появится вторая гармоника, которая, в сущности, является методической погрешностью при измерении КНИ. Расчёты для стандартного сейсмоприёмника показывают, что эта погрешность занижает значение нелинейности примерно на 20 %.

В принципе указанную методическую погрешность можно исключить и получить истинное значение КНИ. Однако задача осложняется тем, что могут быть и иные источники нелинейности, кроме нелинейности магнитного поля. Поэтому необходимы специальные исследования, которые позволяют оценить возможности и точность электрического определения КНИ.

4. Основные выводы и рекомендации

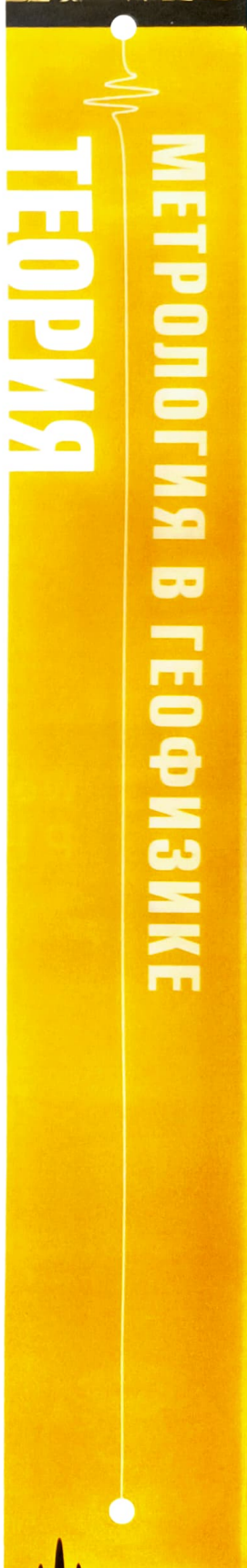
Кратко обобщим изложенный материал.

При рассмотрении сейсмоприёмников как рабочих средств измерений (РСИ), а также эталонных сейсмоприёмников, используемых непосредственно для поверки и калибровки рабочих приборов, следует использовать простую модель, описываемую передаточной функцией (5) или (6). Для определения частных параметров наиболее достоверным является метод с использованием экспериментальных АЧХ и ФЧХ. Метод позволяет определить собственную частоту с погрешностью не более 0,5 %, а коэффициент демпфирования η и коэффициент преобразования K с погрешностью не более 1-2 %.

Метод определения параметров по АФХ достаточно трудоёмкий, поэтому его следует использовать только при ответственных испытаниях, например, при утверждении типа средств измерений. Для оперативного контроля сейсмоприёмников рекомендуется применять определение переходной или импульсной переходной характеристики, возбуждаемой электрическим током.

Обработку переходных характеристик целесообразно проводить методом линейного прогнозирования. Определение собственной частоты и коэффициента демпфирования не требует каких-либо данных о параметрах сейсмоприёмника и может производиться с погрешностью не более соответственно 0,5 и 2 %. Для определения этим методом коэффициента преобразования необходимо в технической документации указывать массу подвижной части. Погрешность при этом совпадёт с возможным технологическим разбросом значения этой массы.

В качестве альтернативного способа опреде-





ления собственной частоты возможно использовать также метод нахождения электромеханического резонанса. Погрешность этого метода не превышает 1 %.

Сложным и до конца не решённым вопросом является определение нелинейности электрическим методом. Требуется проведение специальных испытаний с определением КНИ одних и тех же приборов на высокоточном стенде и параллельно при электрическом возбуждении. По материалам данных испытаний следует уточнить методику определения КНИ с помощью генераторов электрического тока. До аттестации такой методики оценками КНИ, полученными электрическими методами, рекомендуется пользоваться только как ориентировочными.

Литература

1. ГОСТ 8.00984 ГСИ. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений.
2. ГОСТ 2813489 Сейсмоприёмники электродинамические. Типы, основные параметры и технические требования.
3. ГОСТ 2434680 Вибрация. Термины и определения.
4. ГОСТ Р 523342005 Гравиразведка. Термины и определения.
5. Гамбурцев Г.А. Основы сейсморазведки. М., Гостоптехиздат, 1959.
6. Слуцковский А.И. Сейсморазведочная аппаратура. М., "Недра", 1970.
7. Рыжов А.В. Теоретические исследования сейсмоприёмни-

ков // Геофизика 1997 - № 3

8. Шведчиков Л.К. Теория электродинамического сейсмоприёмника с учётом индуктивных связей между обмотками и проводящим каркасом подвижной катушки // Прикладная геофизика, вып. 95. М., Недра, 1979.

9. Шведчиков Л.К. Определение параметров электродинамического сейсмоприёмника методом обращения // Прикладная геофизика, вып. 101. М., Недра, 1981.

10. Юшин В.И. Теория и цифровая модель сейсмоприёмника с точки зрения геофизика инженера и программиста // Приборы и системы разведочной геофизики. 2002. № 2.

11. Основы автоматического управления / Под ред. В.С. Пугачёва. М., Наука, 1968.

12. Ф.Е. Евдокимов. Общая электротехника. М., Высшая школа, 2004.

13. Э. М. Бромберг, А.Е. Манохин, О. С. Максумов. Погрешности измерений нелинейных искажений электродинамических сейсмоприёмников // Изм. техника. 1990. № 2.

14. Никитский В.В., Стаско А.В. Анализ переходных процессов методом линейного прогнозирования // Измерительная техника. 1997. № 10.

15. Голд Б., Рейдер Ч. Цифровая обработка сигналов. М., "Советское радио", 1973.

16. S.M. Kay, J.R. Marple. Spectrum Analysis A Modern Perspective. IEEE Trans., v. 69, № 11, nov. 1981.

17. Стаско А.В., Симаков В.С., Федотов С.А. Математическое моделирование нелинейного сейсмоприёмника // Разведка и охрана недр 2002 № 3 4.

18. Патент 2155358 (РФ). Электродинамический сейсмоприёмник ускорений с наименьшим коэффициентом нелинейных искажений / А.В. Рыжов. Оpubл. в Б.И., 2000, № 24.



World Leader in Magnetotellurics PHOENIX GEOPHYSICS



- Многофункциональная и специализированная электроразведочная аппаратура для всех наземных ЕМ методов. Высокоточная GPS синхронизация всех приборов.
- Датчики, приёмники, генераторы, мониторинговые системы, вспомогательное оборудование.
- Полный комплект аппаратурно-технических средств и программного обеспечения для выполнения полевых измерений, обработки и интерпретации. Русифицированная документация. Сдача под ключ на объекте Заказчика.
- Централизованное обучение обслуживающего персонала и курсы повышения квалификации в России. Гарантийное сервисное обслуживание в течение трех лет

Системы в полном комплекте для поисков, разведки, мониторинга и научных исследований

Тел: +1 416 491-7340 Факс: +1 416 491-7378 www.phoenix-geophysics.com mail@phoenix-geophysics.com