

Хотя теория сейсмоприемника давно является достоянием географов, справочников и учебников [1, 2], некоторые ее следствия, полезные для геофизиков, имеющих дело с цифровой обработкой данных, практически не освещены в доступной литературе. Это касается, прежде всего, аналитических выражений реакции сейсмоприемника на импульсные воздействия, которые раньше, по-видимому, просто не были востребованы практикой. Кроме того, современная высоко-точная цифровая запись позволяет по-новому подойти к проблеме тестирования сейсмоприемников и анализу их нелинейностей. Наконец, еще один важный аспект теории связан с проблемой цифрового моделирования работы сейсмоприемника - решением прямой задачи (нахождения выходного сигнала по входному) непосредственно во временной области, не прибегая к преобразованию Фурье или интегралу свертки. Последняя задача представляется особенно полезной в учебных целях.

Всякий сейсмоприемник инерционного типа можно рассматривать как устройство, позволяющее наблюдать (измерять) колебания почвы из относительно неподвижной точки пространства. В качестве такой опорной точки используется упруго подвешенный внутри жесткого корпуса на пружине массивный груз (маятник). Для измерения относительного движения корпуса и маятника служит чувствительный элемент, представляющий собой катушку, которая одновременно выполняет конструктивную роль маятника, и постоянный магнит как составная часть корпуса. Перемещаясь в кольцевом зазоре магнита, катушка вырабатывает электрическое напряжение, пропорциональное скорости взаимного смещения. Кроме того, металлический каркас катушки, являясь короткозамкнутым витком, оказывает тормозящее (демпфирующее) действие на движение маятника, пропорциональное скорости. Это демпфирование необходимо, чтобы маятник оставался "как можно более неподвижным" при любом колебательном движении корпуса. Демпфирование можно еще усилить, если разрешить протекание тока в катушке, для чего достаточно зашунтировать выход сейсмоприемника резистором.

Хотя, как видно уже из этого описания, механические и электрические характеристики сейсмоприемника тесно связаны, для анализа целесообразно рассмотреть их отдельно. Механическую часть сейсмоприемника будем характеризовать тремя конструктивными параметрами: массой маятника M , кг, жесткостью пружины K , Ньютон/м, и коэффициентом скоростного сопротивления H , Ньютон·секунда/м. К электрической части отнесем только коэффициент скоростного механоэлек-

трического преобразования K_e , В·с/м паспортный параметр, характеризующий чувствительность приемника.

Дифференциальное уравнение механического сейсмоприемника Предположим, что корпус и маятник имеют только по одной степени свободы вдоль одной и той же оси. Предположим далее, что движение корпуса жестко задано извне перемещением грунта $x(t)$ в абсолютной (инерциальной) системе координат. При этом маятник вынужден перемещаться в той же системе координат под действием упомянутых механических связей его с корпусом по закону $u(t)$. Это движение в любой момент времени и при любом законе движения корпуса $x(t)$ полностью определяется равновесием трех сил, действующих на маятник: силой инерции маятника, направленной встречно его ускорению в инерциальной системе, силой сопротивления демпфера, встречно-пропорциональной относительной скорости движения маятника относительно корпуса, и силой пружины, встречно-пропорциональной смещению маятника относительно корпуса. Условие равновесия этих сил можно записать как:

$$-Mu'' - H(u' - x') - K(u - x) = 0 \quad (1)$$

Теперь предположим, что воображаемый "наблюдатель" размещен на маятнике, и, стало быть, может измерять только величину смещения $y(t)$ корпуса относительно маятника:

$$y = x - u. \quad (2)$$

Эту величину мы и будем рассматривать как выходную величину механического сейсмоприемника. Избавляясь в уравнении (1) с помощью соотношения (2) от практически недоступной измерению величины $u(t)$ и ее производных, получим дифференциальное уравнение, связывающее входную $x(t)$ и выходную $y(t)$ величины сейсмоприемника¹:

$$My'' + Hy' + Ky = Mx'' \quad (3)$$

Коэффициенты M , H и K являются конструктивными параметрами. Для пользователя удобнее другие параметры, называемые динамическими, а именно:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (4)$$

собственная угловая частота свободных колебаний маятника при отсутствии демпфирования,

$$\zeta = \frac{H}{2\sqrt{KM}} \quad (5)$$

безразмерный коэффициент демпфирования,

$$\varepsilon = \zeta \omega_0 \quad (6)$$

затухание, или абсолютный коэффициент демпфирования.

Переходя к символической форме записи операции дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$, перепишем

¹ В большинстве известных литературных источников, например [1], это уравнение приводится со знаком минус в правой части. Это справедливо, если в качестве выходной величины вместо (2) принять $y = u - x$, то есть, разместить "наблюдателя" не на маятнике, а на корпусе. Дискуссию по этому поводу см. в работах А.В.Рыжова [4, 6] и В.И.Юшина [5]. Точку зрения А.В.Рыжова на некорректность варианта записи уравнения (3) со знаком минус в правой части мы по-прежнему считаем ошибочной.

уравнение (3), связывающее закон перемещения корпуса $y(t)$ во времени и выходной сигнал $x(t)$, в виде:

$$(p^2 + 2\epsilon p + \omega_0^2)y = p^2 x. \quad (7)$$

Передаточная функция механического сейсмоприемника. Применяя к обеим частям уравнения (7) преобразование Лапласа, получим

$$(p^2 + 2\epsilon p + \omega_0^2)Y(p) = p^2 X(p). \quad (8)$$

где p теперь играет роль комплексной переменной, имеющей вид $p = a + j\omega$, а $X(p)$ и $Y(p)$ представляют собой изображения Лапласа, соответственно, входного и выходного сигналов датчика. Отношение изображений Лапласа выходной и входной величин называется **передаточной функцией** линейной системы [7]. Передаточная функция механического сейсмоприемника, исходя из (8), определяется как

$$D(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{p^2}{p^2 + 2\epsilon p + \omega_0^2} \quad (9)$$

Передаточная функция является исчерпывающей характеристикой линейной системы, поскольку позволяет выразить реакцию системы на сигнал любой формы. Однако, обращаясь к передаточной функции сейсмоприемника, надо оговаривать, какая именно характеристика движения корпуса имеется в виду: смещение, скорость или ускорение. Так, выражение (9) есть **передаточная функция по отношению к смещению корпуса**. Она безразмерна, поскольку преобразует абсолютное смещение корпуса в относительное смещение корпуса и маятника. Но этим же самым датчиком можно измерять, например, ускорение корпуса. В этом случае мы говорим о передаточной функции того же самого механического сейсмоприемника **по ускорению**², которая будет иметь вид:

$$D_A(p) = \frac{Y(p)}{p^2 X(p)} = \frac{1}{p^2 + 2\epsilon p + \omega_0^2} \quad (10)$$

и размерность времени в квадрате. Однако для всех передаточных функций сейсмоприемника инвариантом остается знаменатель рациональной дроби (9, 10), называемый в теории автоматического управления [7] **характеристическим полиномом**, который принято отображать одной из следующих форм записи:

$$Q(p) = p^2 + 2\epsilon p + \omega_0^2 = (p + \epsilon)^2 + \omega_1^2 = (p - p_1)(p - p_2), \quad (11)$$

где

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \epsilon^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (12)$$

представляет собой частоту свободных колебаний демпфированного маятника, p_1 и p_2 являются корнями **характеристического уравнения** датчика, определяемого как $Q(p) = 0$:

$$p_{1,2} = -\epsilon \pm j\omega_1 = \omega_0 (\zeta \pm j\sqrt{1 - \zeta^2}). \quad (13)$$

Таким образом, несмотря на многообразие представлений динамических параметров сейсмоприемника, базовыми его параметрами можно считать только два: ω_0 и ζ . Остальные вспомогательные, производные от базовых. Необходимость же их разнообразия обусловлена удобством или краткостью записи при решении различных задач теоретического и экспериментального характера. Так, например, вторая форма записи характеристического полинома (11) соответствует табличной

² Здесь и далее индексы при символах передаточных функций будут означать: S - по смещению корпуса, V - по скорости, A - по ускорению.

форме преобразования Лапласа и позволяет сразу получить аналитический вид реакции датчика на скачок смещения. Частота ω_0 это реально существующая угловая частота собственных колебаний, а ζ - затухание, здесь ее период по осциллограмме, а также как частоту ω_0 можно измерить, только лишь датчик затухания, что в случае сейсмоприемника невозможно. Корни p_1 и p_2 характеристического уравнения (они же - полюса передаточной функции) часто используются в качестве паспортных параметров вместо собственных частот и затухания, особенно, в зарубежной литературе.

Частотная характеристика и импульсная переходная функция. Если в выражении передаточной функции $D(p)$ заменить комплексную переменную p на чисто мнимую $p = j\omega$, то передаточная функция становится комплексной функцией $D(j\omega)$ угловой частоты ω и называется **частотной передаточной функцией**, или **комплексной частотной характеристикой** (КЧХ). Хотя КЧХ также не зависит от входного сигнала, из соображений прояснения физического смысла ее можно определить как реакцию системы на гармоническое воздействие вида $\exp(j\omega t) = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t)$, отнесенную к этому воздействию. Как всякая комплексная функция она может быть представлена либо модулем и аргументом, либо вещественной и мнимой частями:

$$D(j\omega) = |D(j\omega)| \exp(\arg D(j\omega)) = \operatorname{Re}[D(j\omega)] + j \operatorname{Im}[D(j\omega)] \quad (14)$$

Модуль частотной характеристики называется **амплитудно-частотной характеристикой** (АЧХ), аргумент **фазо-частотной характеристикой** (ФЧХ).

Функция времени, полученная с помощью обратного преобразования Фурье частотной характеристики, называется **импульсной переходной функцией**

$$d(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} D(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (15)$$

Импульсная переходная функция пропорциональна реакции системы во времени на импульсное воздействие в виде дельта-функции, но в отличие от самой реакции, имеющей размерность сигнала, характеризуется размерностью, обратной времени (если, конечно, передаточная функция безразмерна). Также как передаточная функция и как частотная характеристика, импульсная переходная функция является исчерпывающей характеристикой линейной системы. В частности, ее преобразование Фурье дает комплексную частотную характеристику:

$$D(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} d(t) e^{-j\omega t} dt \quad (16)$$

При практических расчетах, связанных с экспериментом, пользуются не угловыми (рад/с), а циклическими частотами $f = \omega/2\pi$, измеряемыми в Гц. Выполняя замену $p = j2\pi f$ в выражении (9), получаем следующие выражения для частотных характеристик механического сейсмоприемника:

Комплексная частотная характеристика:

$$D(jf) = \frac{-(f_0^2 - f^2)}{\sqrt{(f_0^2 - f^2)^2 + (2\zeta f_0 f)^2}} + j \frac{2\zeta f_0 f}{\sqrt{(f_0^2 - f^2)^2 + (2\zeta f_0 f)^2}}, \quad (17)$$

Амплитудно-частотная характеристика

$$D(f) = |D(f)| \sqrt{\frac{1}{(1 - \zeta^2)^2 + (2\zeta f/f_0)^2}} \quad (18)$$

Фазо-частотная характеристика³

$$\varphi(f) = \arg(1 - \zeta^2 + j 2\zeta f/f_0) \quad (19)$$

Иногда используется еще одна форма представления. Введя безразмерную частоту $v = f/f_0$, можем выразить амплитудную и фазовую характеристики механического сейсмоприемника в удобной реальной форме:

$$D(v) = |D(v)| = \frac{v}{\sqrt{(1 - v^2)^2 + (2\zeta v)^2}} \quad (20)$$

$$\varphi(v) = \arg(v^2 - 1 + j 2\zeta v) \quad (21)$$

Семейство нормированных амплитудных и фазовых характеристик в зависимости от относительной частоты v при различных коэффициентах демпфирования ζ приведено на рис.1. Из рис.1а хорошо видно, что амплитудные характеристики, построенные в билогарифмическом масштабе, носят асимптотический характер. В частности, в данном случае налицо две асимптоты, так же отображенные на рис.1а, выражения для которых можно получить из (20) с помощью предельных переходов, устремляя переменную v к 0 и к ∞ :

$$\lim_{v \rightarrow 0} D(v) = v^2; \quad \lim_{v \rightarrow \infty} D(v) = 1. \quad (22)$$

Обе асимптоты АЧХ пересекаются при $v = 1$, то есть, точно на частоте собственных не демпфированных колебаний сейсмоприемника, которая по этой причине иногда называется частотой первого излома асимптот. В билогарифмическом масштабе левая асимптота, или левая ветвь, имеет наклон 40 дБ/дек, а правая 0 дБ/дек. Это означает, что в области частот левее частоты излома маятник механического сейсмоприемника смещается относительно корпуса на величину, примерно пропорциональную ускорению, то есть, является акселерометром. Правее частоты излома он работает как сейсмометр, выдавая сигнал, пропорциональный смещению корпуса. Эта ветвь обычно считается рабочей в отличие от левой, которая называется низкочастотным завалом. ФЧХ на левой ветви показывает опережение по фазе на величину π , на частоте излома опережение на $\pi/2$ независимо от затухания, а правее излома асимптотически стремится к нулю.

Полезно обратить внимание на один, кажущийся парадокс. Согласно формуле (12) частота демпфированных свободных колебаний ω_d всегда ниже частоты не демпфированных колебаний ω_0 . Между тем, из графиков частотных характеристик на рис.1а видно, что с увеличением демпфирования их экстремум смещается вверх по частоте. Отсюда следует, что видимый период свободных колебаний на записи переходного процесса, точно отображающий частоту ω_d , нельзя отождествлять с положением экстремума соответствующей частотной характеристики.

Сейсморазведочный - приемник велосиметр - геофон. Как упоминалось выше, реаль-

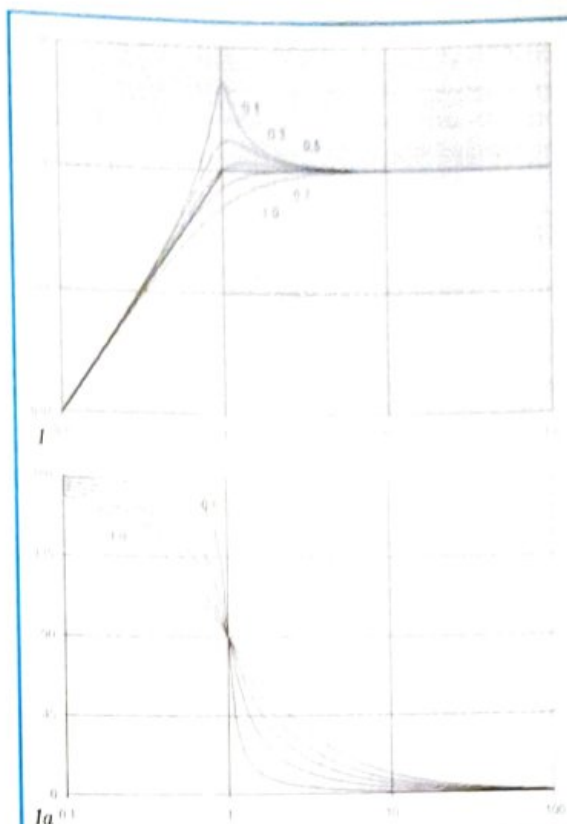


Рис.1. Нормированные амплитудные и фазовые характеристики механического сейсмоприемника по смещению и индукционного сейсмоприемника по скорости при различных коэффициентах демпфирования.

ный сейсмоприемник отличается от механического наличием индукционного преобразователя смещения маятника в электрический сигнал, пропорциональный скорости этого смещения. Датчик такого типа в сейсмометрии принято называть велосиметром, а в сейсморазведке - геофоном. Его передаточная функция по смещению корпуса имеет вид

$$V_s(p) = K_v p D(p), \quad (23)$$

где K_v коэффициент механоэлектрического преобразования чувствительного элемента по относительной скорости перемещения маятника и корпуса (размерность В с/м). Нетрудно заметить, что передаточная функция велосиметра по скорости пропорциональна передаточной функции (9) механического сейсмоприемника по смещению

$$V_v(p) = \frac{Y(p)}{p X(p)} = K_v D(p). \quad (24)$$

Эта характеристика, представленная в форме АЧХ и ФЧХ, обычно приводится в качестве паспортной для современных индукционных сейсморазведочных приемников. Надо только помнить, что чувствительность K_v и затухание ζ геофона зависят не только от конструктивных параметров датчика, но и от входного сопротивления последующего аппаратурного тракта, включая внешний шунтирующий резистор, снижающий реальную чувствительность. Эти зависимости обычно отображаются в паспорте датчика.

Все вышеприведенные выражения для частотных характеристик не содержат ограничений по верхней частоте. Реальные сейсмоприемники всегда имеют такие ограничения. В одних

³ В литературе ФЧХ обычно приводится в виде функции арктангенса отношения мнимой и реальной части. Для систем 2-го порядка и выше такое представление страдает неоднозначностью [5]. Учитывая, что все математические программные пакеты в настоящее время снабжены функциями вычисления аргумента комплексных чисел, предлагаемая запись более удобна. Для этой же цели может быть использована функция табулированного арктангенса, обозначаемая в математических пакетах как ATAN2

случаях это паразитные резонансы электромагнитной части датчика, неидеальность чувствительного элемента измерителя смещения, но, чаще всего, на первый план выступает аппаратный тракт цифрового регистратора с его обязательным антиаллисинг-фильтром. При этом оказывается, что передаточная функция и, соответственно, АЧХ имеет еще один излом в области высоких частот, но теперь уже с отрицательным наклоном. Таким образом, сейсмоприемник вместе с аппаратным трактом всегда имеет ограниченную полосу пропускания не только со стороны низких, но и со стороны высоких частот. Часть АЧХ правее второго излома будем называть правой ветвью АЧХ, или ее высокочастотным завалом. В общем случае, можно представить полную частотно-ограниченную передаточную функцию сейсмоприемника как произведение передаточной функции (24) и некоторой обобщенной передаточной функции типа фильтра низких частот $G(p)$.

Представим $G(p)$ в виде произведения постоянного коэффициента передачи K и нормированной безразмерной функции $G_0(p)$

$$G(p) = K \cdot G_0(p) \quad (25)$$

Коэффициент K может быть либо безразмерным, если рассматривается выходное напряжение на выходе датчика, либо имеет размерность коэф. B (в англоязычной литературе count/V), если выходным сигналом является цифровая запись. Полагая, что входным сигналом является смещение корпуса, можем выразить передаточную функцию сквозного канала "велосиметр-аппаратурный тракт" по смещению как

$$\begin{aligned} W_s(p) &= K_s \cdot K_c \cdot p \cdot D(p) \cdot G_0(p) = \\ &= K_s \cdot K_c \cdot p \cdot \left(\frac{p^2}{(p+\varepsilon)^2 + \omega_1^2} \right) \cdot G_0(p) \end{aligned} \quad (26)$$

Найдем реакцию такой системы на воздействие в форме ступенчатого смещения корпуса на высоту x_0 . Такое воздействие можно выразить произведением $x_0 l(t)$, где

$$l(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (27)$$

есть единичная ступенчатая функция Хевисайда, имеющая изображение Лапласа $1/p$.

Очевидно, изображением Лапласа реакции велосиметра на скачок смещения корпуса величиной x_0 будет произведение передаточной функции велосиметра по смещению (26) на изображение Лапласа ступенчатой функции (27) и на ее фактическую высоту x_0 :

$$\begin{aligned} U(p) &= W_s(p) \cdot \frac{x_0}{p} = x_0 \cdot K_s \cdot K_c \cdot \\ &\cdot \left(\frac{p^2}{(p+\varepsilon)^2 + \omega_1^2} \right) \cdot G_0(p) \end{aligned} \quad (28)$$

Обратим внимание на то, что это выражение с точностью до постоянной x_0 совпадает с передаточной функцией велосиметра по скорости, а так же может быть также представлено как

$$\begin{aligned} U(p) &= x_0 \cdot W_v(p) = x_0 \cdot K_c \cdot K_s \cdot p \cdot \\ &\cdot \left(\frac{p}{(p+\varepsilon)^2 + \omega_1^2} \right) \cdot G_0(p). \end{aligned} \quad (29)$$

В последнем выражении дробь в круглых скобках можно интерпретировать как изображение Лапласа реакции механического сейсмоприемника (9) на единичную функцию (27). Для такой дроби известно ее обратное преобразование Лапласа [9]:

$$u(t) = e^{-\varepsilon t} \left(\cos \omega_1 t - \frac{\varepsilon}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) l(t) \quad (30)$$

Следовательно, формулу (30) можно рассматривать как единичную реакцию механического сейсмоприемника (переходный процесс во времени) на единичный ступенчатый смещение с его корпусом. На единицу рассматриваемого смещения.

Теперь, чтобы получить аналитическое выражение реакции велосиметра на скачок с амплитудой x_0 во времени, необходимо преобразовать единичную реакцию механического датчика (9) в соответствии с выражением (29) и применимыми свойствами оригиналов и их изображений по Лапласу, а именно, продифференцировать выражение (30), добавить все необходимые коэффициенты из формулы (29) и выполнить свертку с импульсной переходной функцией $q(t)$ фильтра $G_0(p)$

$$v(t) = x_0 \cdot K_s \cdot K_c \cdot \left[\frac{d}{dt} u(t) \right] * q(t) \quad (31)$$

где знак $*$ означает операцию свертки. Опуская временно свертку, что означает игнорирование высокочастотного завала, получим идеализированную реакцию велосиметра на скачок x_0 :

$$\begin{aligned} v(t) &= x_0 \cdot K_s \cdot K_c \cdot \left[\delta(t) - 2\varepsilon e^{-\varepsilon t} \cdot \right. \\ &\cdot \left. \left(\cos \omega_1 t + \frac{\omega_1^2 - \varepsilon^2}{2\omega_1 \varepsilon} \sin \omega_1 t \right) \right] l(t) \end{aligned} \quad (32)$$

где $\delta(t)$ дельта-функция Дирака, полученная как производная от функции Хевисайда.

Формула (32) и ее интегралы могут служить аналитическими трафаретами при анализе цифровой записи отклика реального датчика с точки зрения оценки его динамических параметров, а также возможных нелинейностей. Обратим внимание на важный факт: первые два интеграла от (32) на полубесконечном интервале должны быть равны нулю, поскольку содержат в качестве множителя затухающую экспоненту. Это легко показать прямым интегрированием выражения (32) с учетом свойства интеграла от дельта-функции:

$$\begin{aligned} z(t) &= \int_0^t v(t) dt = x_0 \cdot K_s \cdot K_c \cdot e^{-\varepsilon t} \cdot \\ &\cdot \left(\cos \omega_1 t - \frac{\varepsilon}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right) l(t) \end{aligned} \quad (33)$$

$$a(t) = \int_0^t z(t) dt = \frac{x_0 \cdot K_s \cdot K_c}{\omega_1} e^{-\varepsilon t} (\sin \omega_1 t) l(t) \quad (34)$$

Выражение (33) представляет собой реакцию велосиметра на скачок скорости корпуса амплитудой x_0 м/с и отражает тот факт, что по окончании переходного процесса, вызванного этим скачком, маятник сейсмоприемника возвращается в исходное (нулевое) положение относительно корпуса и останавливается. С точностью до коэффициента $x_0 K_s K_c$ оно совпадает с единичной реакцией (30) механического сейсмоприемника. Выражение (34) описывает реакцию велосиметра на скачок ускорения, а наличие в нем экспоненциально стремящегося к нулю множителя означает, что маятник, в конце концов, останавливается, хотя и новом (ненулевом) положении относительно корпуса.

Еще одно замечательное свойство импульсного отклика (32) и его интегралов (33) и (34) состоит в том, что их взвешенная сумма сворачивается в дельта-функцию:

$$v(t) + 2\varepsilon z(t) + \omega_0^2 a(t) = x_0 \cdot K_s \cdot K_c \cdot \delta(t) \quad (35)$$

а интеграл от этой суммы дает на нулевом времени ступеньку высотой $x_0 K_s K_c$.

Отмеченные асимптотические свойства отклика и его интегралов полностью сохраняются, если учесть ранее отброшенную операцию свертки с импульсной переходной функцией $g_0(t)$ аппаратного тракта, т.е. учесть высокочастотный завал. В этом случае отклик датчика на скачок смещения выражается как

$$v(t) = \chi_0 K_0 K_s \left[g_0(t) - \left(2\epsilon_1 + \epsilon_2 \right) \cdot \left(\cos \omega_1 t + \frac{\omega_1^2 - \epsilon_1^2}{2\omega_1 \epsilon_1} \sin \omega_1 t \right) * g_0(t) \right] \text{ (36)}$$

В отличие от (32) первое слагаемое этого выражения вместо дельта-функции воспроизводит в чистом виде импульсную переходную функцию аппаратного тракта вместе с высшими "паразитными" резонансами датчика, которые не были учтены в его идеализированной модели (32). Оно имеет вид относительно узкого импульса, который в начальный момент на порядки превосходит второе слагаемое, но быстро затухает (см. рис.2а, где показан экспериментальный отклик на скачок смещения). Второе слагаемое (показано на рис.2б в виде увеличенного фрагмента рисунка 2а вместе с его теоретическим видом) отображает важнейшую низко- и среднечастотную часть переходного процесса датчика, зависящую от основных параметров датчика. Экспоненциально-гармоническая форма второго слагаемого также осложнена сверткой с функцией тракта, но это влияние заметно только на относительно малых временах после воздействия.

Важно отметить, что теоретические свойства импульсных откликов сейсмоприемника дают новый ключ к анализу нелинейностей датчика. Дело в том, что по традиционной методике степень нелинейности оценивается с помощью спектрального анализа гармонических искажений. При этом датчик возбуждается искусственными механическими гармоническими колебаниями, которые сами по себе могут уже содержать такие искажения. При ступенчатом возбуждении форма и даже крутизна такой ступени (с точки зрения наличия в ней нелинейности) не имеют значения. Нелинейность датчика проявляется в процессе его свободных колебаний, когда вынуждающий сигнал уже закончился, и выражается в отсутствии теоретически требуемой сходимости интегралов к нулю, не устранимой никаким подбором начальных условий. На рис.2в и 2г проиллюстрирован эффект интегрирования реального отклика на скачок сейсмоприемника с нелинейностью. Хотя в области дельта-функции различие между экспериментальным и теоретическим откликами весьма существенно (см. рис.2б), первое интегрирование (рис.2в) к моменту окончания вынуждающего импульса полностью его устраняет. Затем, несмотря на то, что этих различий на первичном сигнале (рис.2б) в области свободных колебаний уже почти не заметно, расхождение первых интегралов начинает накапливаться, ослабевая по мере затухания переходного процесса, но уже накопленное смещение сохраняется. Второе интегрирование (рис.2г) выявляет этот эффект еще ярче, вызывая расхождение интеграла.

Цифровая модель сейсмоприемника. В заключение приведем без вывода цифровую рекурсивную модель механического сейсмоприемника по отношению к смещению корпуса, или, что то же самое, нормированную модель

индукционного сейсмоприемника по отношению к виброскорости корпуса. Модель представлена в виде рекуррентной формулы, связывающей три последних входных x_i и три выходных y_i дискретных отсчета

$$y_i = A y_{i-1} - B y_{i-2} + C (x_i - 2x_{i-1} + x_{i-2}), \quad (37)$$

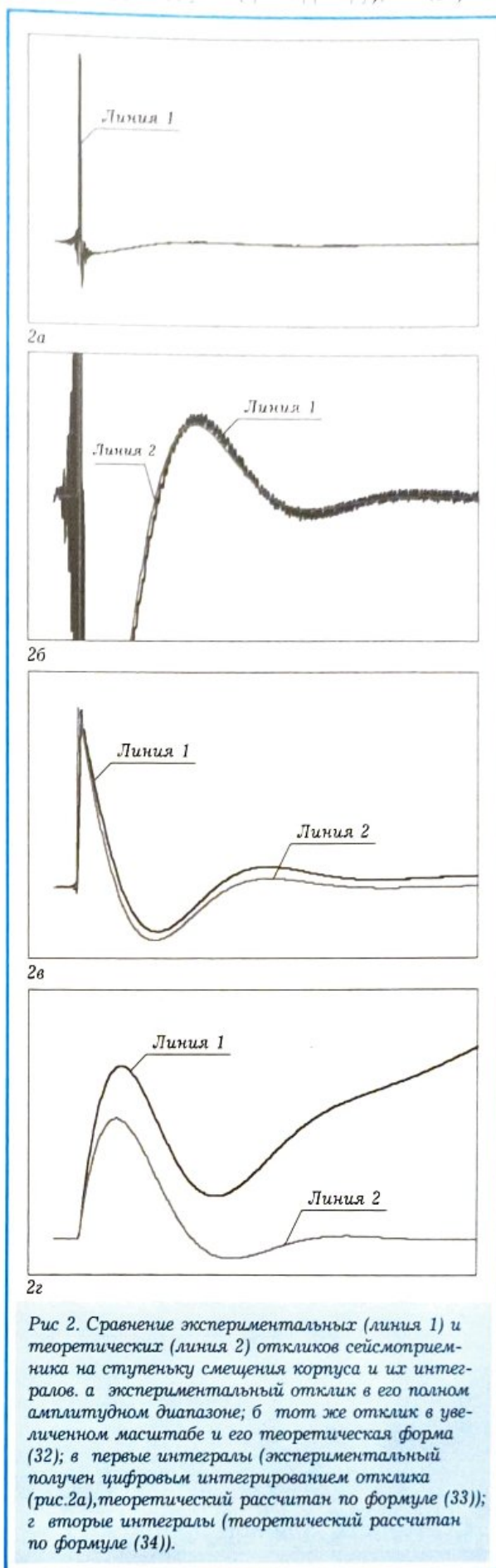


Рис 2. Сравнение экспериментальных (линия 1) и теоретических (линия 2) откликов сейсмоприемника на ступеньку смещения корпуса и их интегралов. а экспериментальный отклик в его полном амплитудном диапазоне; б тот же отклик в увеличенном масштабе и его теоретическая форма (32); в первые интегралы (экспериментальный получен цифровым интегрированием отклика (рис.2а), теоретический рассчитан по формуле (33)); г вторые интегралы (теоретический рассчитан по формуле (34)).

где используются три константы A , B и C , зависящие от динамических параметров ζ и f_0 моделируемого сейсмоприемника и частоты дискретизации f_0 :

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ

Материалы, представляемые для опубликования в журнале должны отвечать следующим требованиям. Статья представляется в электронном виде на компакт-дисках емкостью 640-700 Мб. Форматы текстового файла должны быть в виде Microsoft Word for Windows (версии 6.0 или выше). Графические приложения и таблицы, выполненные электронным образом, представляются в отдельных файлах формата MS Excel (версии 4.0 или выше), либо в формате CorelDRAW версии 7.0 и выше. Все контуры и графики на рисунках, а также все цифры и надписи должны быть выполнены четко, чтобы при уменьшении они легко читались. Рисунки присылаются в виде растровых файлов формата: *TIF с разрешением не менее 250 точек на дюйм (допускается LZW-сжатие), *JPG с качеством не менее 12-ти. Максимально допустимый размер иллюстраций - А4. Подписные подписи представляются в виде отдельного списка. Математические уравнения должны быть выделены четким и ясным шрифтом. Все математические символы скалярных величин набираются курсивом, а векторные - жирной прямой заглавной буквой. Вместе со статьей в редакцию направляются краткие сведения об авторах, необходимо указать город, место работы и должность, научную степень.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ № 02(02)/2002
ЕЖЕКВАРТАЛЬНОЕ ОФИЦИАЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ САРАТОВСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ ЕВРО-АЗИАТСКОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА