

От акселерометров к сейсмоприёмникам ускорения

Рыжов А.В., ГФУП "ВНИИГеофизика", г. Москва

Введение

Как известно [6], сейсмические сигналы пропорциональны ускорению колебаний изучаемой среды. И поэтому акселерометры имеют лучшую разрешающую способность в сравнении с широко применяемыми электродинамическими сейсмоприёмниками с выходными сигналами, пропорциональными скорости колебаний среды. Но, давно применяемые в сейсморазведке пьезоэлектрические акселерометры имеют такие недостатки, как: большая спектральная плотность шума (особенно, на низких частотах [6]), необходимость применения усилителей с источниками питания. Около десяти лет назад появились сведения о разработках компенсационных акселерометров КА-600, выполненного на основе прибора используемого в навигации [2], и VectorSeis, изготовленного фирмой Input/Output на основе технологии микроэлектромеханических систем (MEMS) [11] - для применения их в сейсморазведке в качестве приемников сейсмических сигналов.

Акселерометр, рассмотренный в [2], кроме высокой стоимости (на два порядка превышающей стоимость электродинамического сейсмоприёмника), имеет и другой недостаток, связанный с ограничением частотного диапазона справа частотой 100 Гц. Такой частотный диапазон подходит далеко не для всех задач, решаемых сейсмическими исследованиями. Причину ограничения частотного диапазона компенсационного акселерометра можно было бы установить по его передаточной функции. Но, полученные в литературных источниках [4, 7, 8] передаточные функции не соответствуют объективной реальности, так как в прямой цепи сигнального графа акселерометра отсутствует включённое параллельно ёмкостному преобразователю звено, отражающее генераторный режим электродинамического преобразователя, применённого в режиме двигателя в цепи обратной связи. К тому же, в источниках [4, 7] не учтена индуктивность обмотки электродинамического преобразователя, а в [7, 8] передаточная функция механического колебательного звена имеет ошибочный отрицательный знак, заимствованный, видимо, из геофизической литературы.

Передаточная функция компенсационного акселерометра

Рассмотрим работу компенсационного осевого акселерометра по электромеханической схеме, изображённой на рисунке 1. В схему акселерометра входят: корпус 1, основание 2, соединённое с инерционным телом 3 пружинами 4, две последовательно соединённые обмотки 5, установленные на инерционном теле и размещённые в воздушных кольцевых зазорах магнитных систем 6; ёмкостной преобразователь перемещений, включающий в себя генератор G , два сопротивления R , две конденсаторные пластины 7, установленные на инерционном теле, две торцевые поверхности магнитных систем 6, выполняющие функции конденсаторных пластин [2], и (аналогичное применяемому Раменским приборостроительным конструкторским бюро в своих акселерометрах) электронное устройство, состоящее из двух усилителей переменного напряжения, двух выпрямителей и дифференциального усилителя. Основание 2, пружины 4 и инерционное тело 3 с двумя обмотками 5 составляют механическое колебательное звено. (Механическое колебательное звено без обмоток 5, именуемое в [4] как чувствительный элемент, в современных приборах изготавливается по технологии MEMS в виде одной детали из монокристаллического кремния). Постоянная времени (далее в тексте постоянная) звена равна $\tau_0 = \sqrt{m/k}$ (m – масса инерционного тела, k – жёсткость пружин). Коэффициент преобразования ёмкостного преобразователя равен K_E . Его выходной сигнал поступает на вход усилителя с коэффициентом усиления K_U . Напряжение с выхода усилителя поступает на обмотки 5, соединённые с эталонным сопротивлением R_B . Обмотки вместе с магнитными системами

составляют электродинамический преобразователь, используемый в акселерометре как электрический двигатель с коэффициентом преобразования K_D . Обмотки имеют общее сопротивление R и общую индуктивность L . Ток, протекающий в цепи $L \rightarrow R \rightarrow R_B$, создаёт на сопротивлении R_B напряжение U_B , являющееся выходным сигналом акселерометра.

Приложив постоянную силу к корпусу компенсационного осевого акселерометра, находящегося в состоянии покоя (перемещение и скорость равны нулю), рассмотрим его равноускоренное движение в инерциальной системе координат. За отрезок времени, равный t , акселерометр переместится на величину $x_k = \ddot{x}_k t^2 / 2$ (где $\ddot{x}_k$ – ускорение акселерометра). Вместе с корпусом на ту же величину переместятся и верхние концы пружин, соединённые с основанием. В этот же момент времени инерционное тело, соединённое с нижними концами пружин, поступательно переместится на величину

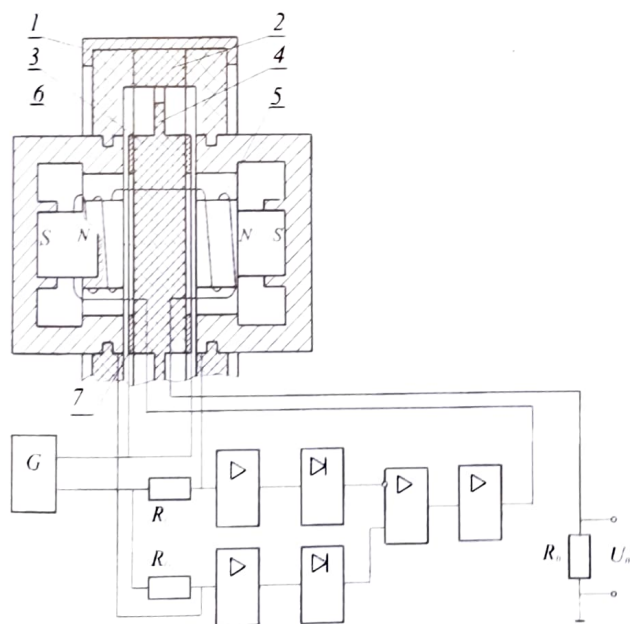


Рисунок 1. Электромеханическая схема компенсационного акселерометра

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ
СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

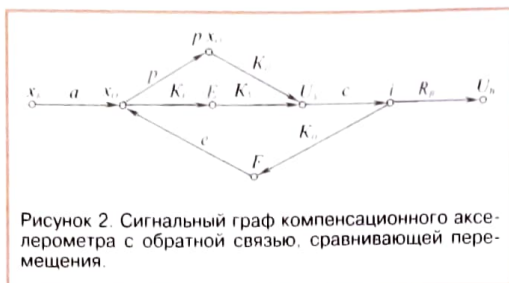


Рисунок 2. Сигнальный граф компенсационного акселерометра с обратной связью, сравнивающей перемещения.



Рисунок 3. Сигнальный граф компенсационного акселерометра с обратной связью, сравнивающей силы.

ну x_m , меньшую, чем перемещение корпуса. Емкостной преобразователь перемещений создаст на своём выходе напряжение, пропорциональное разнице перемещений x_k и x_m . Это напряжение, усиленное усилителем, будет складываться с напряжением, создаваемым обмотками, действующими как электродинамический преобразователь сейсмоприёмника. Сложенные напряжения создадут в цепи, состоящей из обмоток и сопротивления R_B , ток. Ток, протекая через обмотки и взаимодействуя с магнитной индукцией в воздушных кольцевых зазорах магнитных систем, вырабатывает силу, пропорциональную величине тока. Сила, воздействуя на инерционное тело, возвратит его в начальное положение относительно корпуса.

Проведённый анализ работы компенсационного акселерометра даёт возможность выделить в нём девять звеньев и, изобразив передаточную функцию каждого звена ветвью, составить его сигнальный граф, показанный на рисунке 2. В этом сигнальном графе ветвь a отображает передаточную функцию механического колебательного звена, приводимого в движение силой, воздействующей на корпус; ветвь K_E – передаточную функцию емкостного преобразователя перемещений; ветвь K_y – передаточную функцию усилителя; ветвь p – передаточную функцию дифференцирующего оператора; ветвь K_n – передаточную функцию и электродинамического преобразователя, и электрического двигателя; ветвь c – проводимость последовательной цепи, включающей индуктивность L и сопротивление R обмоток и сопротивление R_B ; ветвь R_B – эталонное сопротивление; ветвь e – передаточную функцию механического колебательного звена, приводимого в движение силой, прилагаемой к инерционному телу. Из сигнального графа акселерометра найдём его передаточную функцию, выраженную отношением напряжения на его выходе к перемещению корпуса:

$$W_1(p) = \frac{U_B}{x_k} = \frac{a \cdot (K_E K_y + K_n p) \cdot c R_B}{1 + (K_E K_y + K_n p) \cdot c K_n e} \quad (1)$$

В источниках [4, 7] рассматривают работу микроэлектромеханических систем с помощью структурных схем. В этих схемах входной сигнал представляет собой ускорение, а не перемещение, как в сигнальном графе на рисунке 2, и обратная связь вычитает не перемещения, а силы. Сигнальный граф компенсационного акселерометра, построенный на сравнении сил, изображён на рисунке 3. Передаточная функция этого сигнального графа имеет вид:

$$W_1(p) = \frac{U_B}{p^2 x_k} = \frac{me \cdot (K_E K_y + K_n p) \cdot c R_B}{1 + e \cdot (K_E K_y + K_n p) \cdot c K_n} \quad (2)$$

Передаточная функция ветви a получена в [5] и выражается формулой:

$$a = \frac{x_O}{x_k} = \frac{\tau_0^2 p^2}{\tau_0^2 p^2 + 1} \quad (3)$$

Передаточную функцию ветви b найдём из формулы:

$$c = \frac{i}{U_y} = \frac{1}{(R + R_B)(\tau_L p + 1)} \quad (4)$$

где i – ток, протекающий в цепи $L \rightarrow R \rightarrow R_B$, U_y – напряжение на выходе усилителя, $\tau_L = L/(R + R_B)$ – постоянная цепи $L \rightarrow R \rightarrow R_B$.

Передаточная функция ветви e известна и без демпфера имеет вид:

$$e = \frac{x_O}{F} = \frac{1}{k(\tau_0^2 p^2 + 1)} \quad (5)$$

Итак, получены передаточные функции всех звеньев, входящих в компенсационный акселерометр, и, подставив их в (1) или в (2), после преобразований найдём передаточную функцию акселерометра, выраженную отношением напряжения на его выходе к ускорению перемещения корпуса:

$$W_A(p) = \frac{U_B}{p^2 x_k} = \frac{K_E K_y m R_B \cdot (\tau_k p + 1)}{\Sigma_n} \quad (6)$$

$$\tau_k = \frac{K_n}{K_E K_y}$$

где

$$\Sigma_n = k(R + R_B)(\tau_L p + 1)(\tau_0^2 p^2 + 1) + K_E K_y K_n (\tau_k p + 1).$$

После преобразований многочлена Σ_n получим:

$$\Sigma_n = k(R + R_B) \left[\tau_0^2 \tau_L p^3 + \tau_0^2 p^2 + \left(\frac{K_n^2}{k(R + R_B)} + \tau_L \right) p + \frac{K_E K_y K_n}{k(R + R_B)} + 1 \right]$$

Т.к. $K_E K_y K_n$ во много раз больше $k(R + R_B)$, то выражение (6) примет вид:

$$W_A(p) = \frac{U_B}{p^2 x_k} = \frac{m R_B \cdot \tau_k p + 1}{K_n \Sigma_{n1}}$$

$$\text{где } \Sigma_{n1} = \tau_1^2 \tau_L p^3 + \tau_1^2 p^2 + \left(\frac{\tau_1^2}{\tau_0^2} \cdot \tau_L + \tau_k \right) p + 1,$$

$$\tau_1^2 = \frac{m(R + R_B)}{K_E K_y K_n}$$

Приравняем многочлен Σ_{n1} нулю и, подставив численные значения параметров ($m = 5 \cdot 10^{-3}$ кг; $R_B = 240$ Ом; $K_n = 10$ В/м/с; $K_E = 104$ В/м; $K_y = 10$; $R = 260$ Ом; $\tau_L = 2 \cdot 10^{-4}$ с), решим полученное уравнение третьей степени. Если τ_1 будет равно τ_0 , то разница между вычисленным значением действительного корня и постоянной τ_L будет составлять долю процента. И это позволяет нам, в первом приближении, представить многочлен Σ_{n1} в виде:

$$\Sigma_{n1} \approx (C_2 p^2 + C_1 p + 1)(\tau_L p + 1)$$

Перемножив многочлены, получим:

$$\Sigma_{\Pi \approx} \approx C_2 \tau_L p^3 + (C_2 + C_1 \tau_L) p^2 + (C_1 + \tau_L) p + 1$$

Из сравнения многочленов $\Sigma_{\Pi 1}$ и $\Sigma_{\Pi \approx}$ найдём:

$$C_2 = \tau_1^2; \quad C_1 = \tau_K.$$

Итак, в символическом виде передаточная функция компенсационного акселерометра может быть выражена формулой:

$$W_A(p) = \frac{U_B}{p^2 x_K} \approx \frac{m R_B}{K_{\Pi}} \cdot \frac{1}{\tau_1^2 p^2 + \tau_K p + 1} \cdot \frac{\tau_K p + 1}{\tau_L p + 1}. \quad (7)$$

Определяемая знаменателем передаточной функции (7) частота свободных колебаний механического колебательного звена, охваченного обратной связью, отличается от аналогичной частоты, вычисленной по передаточной функции (6), на долю процента.

Из (7) найдём АЧХ акселерометра:

$$A(\omega) = \frac{m R_B}{K_{\Pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - \tau_1^2 \omega^2)^2 + \tau_K^2 \omega^2}} \cdot \frac{\sqrt{\tau_K^2 \omega^2 + 1}}{\sqrt{\tau_L^2 \omega^2 + 1}}. \quad (8)$$

Подставив значения параметров акселерометра в (8), построим его АЧХ, изображённую на рисунке 4 графиком 1. Вызванный недостаточной степенью затухания на частоте 100 Гц резонансный пик АЧХ сокращает верхнюю границу рабочего частотного диапазона акселерометра, по крайней мере, в три раза. Убрать резонансный подъём и, тем самым, расширить частотный диапазон акселерометра можно, создав в нём оптимальную степень затухания. Для того, чтобы ввести необходимое затухание в акселерометр, сначала рассмотрим его как известную в теории автоматического управления следящую систему воспроизведения угла и, построив логарифмическую амплитудную характеристику разомкнутой системы, обеспечим пересечение оси нуля децибел среднечастотной асимптотой этой характеристики под углом 20 дБ/декаду [9]. Это

достигается с помощью введения в следящую систему форсирующего и аperiodического звеньев с общей передаточной функцией:

$$b = \frac{\tau_D p + 1}{\tau_A p + 1}, \quad (9)$$

где τ_D – постоянная форсирующего звена $R_1 C$ (рисунок 5); τ_A – постоянная аperiodического звена $R_2 C$ (рисунок 5).

Передаточная функция усилителя скорректированного акселерометра будет выражаться произведением $K_y b$. Заменяя в (1) K_y на это произведение, получим:

$$W_1(p) = \frac{U_B}{x_K} = \frac{a(K_E K_y b + K_{\Pi} p) c R_B}{1 + (K_E K_y b + K_{\Pi} p) c K_{\Pi} e}. \quad (10)$$

Подставив значения передаточных функций ветвей сигнального графа скорректированного акселерометра в (10), после преобразований найдём его новую передаточную функцию:

$$W_A(p) = \frac{U_B}{p^2 x_K} = \frac{m R_B}{K_{\Pi}} \cdot \frac{\tau_A \tau_K p^2 + (\tau_D + \tau_K) p + 1}{\Sigma_A}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \Sigma_A = & \tau_1^2 \tau_A \tau_L p^4 + \tau_1^2 (\tau_A + \tau_L) p^3 + \\ & + \tau_1^2 \left(1 + \frac{\tau_A \tau_K}{\tau_1^2} + \frac{\tau_A \tau_L}{\tau_0^2} \right) p^2 + \\ & + \left[\frac{\tau_1^2}{\tau_0^2} (\tau_A + \tau_L) + \tau_D + \tau_K \right] p + 1 \end{aligned}$$

Воспользовавшись изложенной в [5] методикой определения частот свободных колебаний и степеней затухания уравнения четвёртой степени, получим:

$$\begin{aligned} W_A(p) = \frac{U_B}{p^2 x_K} = \frac{m R_B}{K_{\Pi}} \cdot \frac{1}{\tau_1^2 p^2 + \tau_D p + 1} \cdot \\ \cdot \frac{\tau_A \tau_K p^2 + (\tau_D + \tau_K) p + 1}{\tau_A \tau_L p^2 + \left[\frac{\tau_1^2}{\tau_0^2} (\tau_A + \tau_L) + \tau_K \right] p + 1}. \quad (12) \end{aligned}$$

В результате проведённых исследований получена передаточная функция компенсационного акселерометра, соответствующая объективной реальности. Из (12) получены АЧХ акселерометра для различных значений постоянной τ_D . Эти АЧХ показаны на рисунке 4 графиками 2, 3, 4. Частотный диапазон акселерометра ограничен частотой, равной:

$$\omega_1 = \frac{1}{\tau_1} = \sqrt{\frac{K_E K_y K_{\Pi}}{m(R + R_B)}}. \quad (13)$$

Увеличивая коэффициент усиления K_y , можно увеличить ω_1 , но повышение K_y ограничено пределом, определяемым потерей устойчивости работы акселерометра [8]. Остаётся один путь расширения частотного диапазона – это уменьшение массы инерционного тела.

Анализ технических характеристик акселерометров

В трёхкомпонентном акселерометре Vector-Seis, разработанном фирмой Input/Output [11], вместо тяжёлого электрического установлен



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ

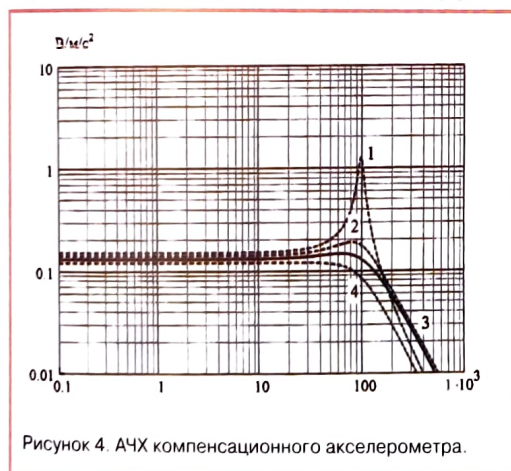


Рисунок 4. АЧХ компенсационного акселерометра.

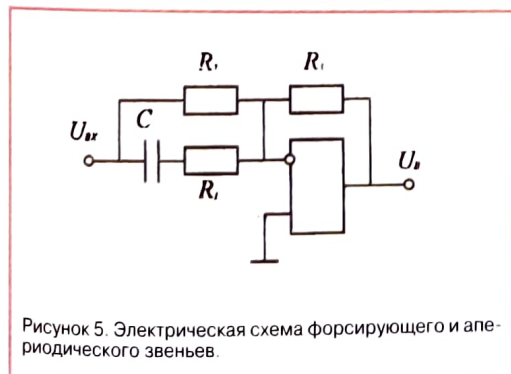


Рисунок 5. Электрическая схема форсирующего и аperiodического звеньев.

Таблица 1

Технические характеристики	Единица измерения	Обозначение акселерометра				
		AK-6	KA-600	Vector-Seis	DSU3-428	SF3000L
Частотный диапазон	Гц	0 - -	0-100	0-1450	0-800	0-1000
Коэффициент преобразования	В/м/с ²	0,12	0,4	-	-	0,12
Спектральная плотность шума	м ² /с ⁴ /Гц	-	-	1,9 · 10 ⁻¹³	1,6 · 10 ⁻¹³	1,6 · 10 ⁻¹¹
В полосе частот	Гц	-	-	3-375	10-200	10-1000
Наименьший входной сигнал	мкм/с ²	2	10	4,4*	5*	30*
Наибольший входной сигнал	м/с ²	100	-	6,9	5	30
Динамический диапазон	дБ	154*	-	124	120	120
КНИ	%	0,02	0,02	0,002	0,003	0,1
Масса	кг	0,05	0,042	0,4▲	0,43▲	0,46▲
Напряжение питания	В	±15	-	12	-	±(6-15)
Потребляемый ток	мА	-	-	-	-	<30
Потребляемая мощность	мВт	-	-	-	300	-
Температурный диапазон	от минус	60	45	40	40	40
	до плюс	70	75	70	70	85

Пояснения к таблице:

* - значение характеристики вычислено;

(-) - характеристика отсутствуют в рекламном листке;

▲ - масса трёхкомпонентного акселерометра.

лёгкий электростатический двигатель, состоящий из двух конденсаторных пластин, одной, размещённой на инерционном теле, другой - на корпусе. Уменьшение массы инерционного тела позволило увеличить частоту ω_1 (формула (13)) и получить частотный диапазон от 0 до 1450 Гц. Но при этом динамический диапазон акселерометра стал равным 124 дБ, а спектральная плотность шума - $1,9 \cdot 10^{-13}$ м²/с⁴/Гц. Аналогичные технические характеристики получила фирма Sersel в трёхкомпонентном акселерометре DSU3-428. У трёхкомпонентного акселерометра SF3000L, разработанного фирмой Applied MEMS по технической документации фирмы Input/Output, спектральная плотность шума на два порядка больше, чем у DSU3-428.

В таблице 1 приведены технические характеристики компенсационных акселерометров. По наименьшему входному сигналу и динамическому диапазону наилучшим среди компенсационных акселерометров является АК-6, разработанный предприятием "Авиаприбор".

Спектральные плотности шумов АК-6 и КА-600 неизвестны. Их приблизительную оценку можно дать по наименьшим воспринимаемым акселерометрами входным сигналам, равным $2 \cdot 10^{-6}$ м/с² и $10 \cdot 10^{-6}$ м/с². Возведём эти величины в квадрат, а затем, разделив на предполагаемые обуженные полосы частот от 1 до 100 Гц, получим: $4 \cdot 10^{-14}$ м²/с⁴/Гц и $2 \cdot 10^{-13}$ м²/с⁴/Гц. У АК-6 наименьшая спектральная плотность шума среди компенсационных акселерометров, но более, чем на порядок превышает техногенный фон Земли.

Как известно [10], шум сейсмометра составляют шумы механического колебательного звена, ёмкостного преобразователя и усилителя цепи обратной связи. Шум компенсационного акселерометра определяют шумы первых двух звеньев. А у низкочастотного усилителя, стоящего в прямой цепи акселерометра, в рабочей

полосе частот отсутствует шум, пропорциональный $1/f$.

Спектральную плотность шума механического колебательного звена можно рассчитать по формуле, полученной в [1] и преобразованной в [6] к виду:

$$S_{(f)} = 16\pi kT (f_0 \beta / m) \quad (14)$$

где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, f_0 - частота свободных колебаний, β - степень затухания.

Для того, чтобы механическое колебательное звено могло обеспечить спектральную плотность шума на уровне техногенного фона ($1 \cdot 10^{-15}$ м²/с⁴/Гц), выражение, стоящее в скобках в (14), должно быть не больше:

$$f_0 \beta / m = S_{(f)} / 16\pi kT =$$

$$= 4,8 \cdot 10^3 \text{ Гц/кг} \quad (15)$$

Это требование выполняется любым электродинамическим сейсмоприёмником на частоте свободных колебаний. Так в SM-11 с $f_0 = 30$ Гц, $\beta = 0,55$ и $m = 9,2 \cdot 10^{-3}$ кг получим

$S_{(f)} = 1,8 \cdot 10^3$ Гц/кг. Среди доступной информации отсутствуют сведения о значениях f_0 , β и m компенсационных акселерометров и только у SF3000L по АЧХ, приведённой в проспекте, можно установить значения частоты свободных колебаний 1000 Гц и степени затухания 0,7. Отнеся весь шум, создаваемый акселерометром, к механическому колебательному звену, подставим полученные значения f_0 , β в формулу (14) и вычислим массу инерционного тела: $1 \cdot 10^{-5}$ кг. Возможно такую же массу имеет и инерционное тело акселерометра VectorSeis, являющегося прототипом SF3000L. Частота свободных колебаний VectorSeis выше 1000 Гц и, видимо, равна верхней частоте частотного диапазона 1450 Гц, а спектральная плотность шума ниже, чем у SF3000L, на два порядка.

На столько снизить шум механического колебательного звена с массой инерционного тела $1 \cdot 10^{-5}$ кг можно, уменьшив в соответствии с формулой (14) во столько же раз степень затухания. В [1] приведены сведения об акселерометре, помещённом в глубокий вакуум (10^{-7} мм ртутного столба), позволивший получить добротность 200 (или степень затухания $2,5 \cdot 10^{-3}$). Спектральная плотность шума механического колебательного звена с частотой свободных колебаний 1450 Гц, степенью затухания $2,5 \cdot 10^{-3}$ и массой инерционного тела $1 \cdot 10^{-5}$ кг равна $7,5 \cdot 10^{-14}$ м²/с⁴/Гц. АЧХ акселерометра с малым затуханием имеет на частоте свободных колебаний острый резонансный пик, подобный показанному графиком 1 на рисунке 4, но на частоте 1450 Гц. (Возможно, по этой причине фирма Input/Output и не приводит в своём проспекте АЧХ акселерометра VectorSeis, а фирма Sersel - DSU3-428).

Верхняя частота частотного диапазона, требуемого для сейсмических исследований, равна 250 Гц. Поэтому, как и в пьезоэлектрическом акселерометре, частота свободных колебаний

механического колебательного звена должна быть в три раза больше. Тогда для звена с частотой свободных колебаний 750 Гц и степенью затухания $2,5 \cdot 10^{-3}$ из уравнения (15) найдём массу инерционного тела: $0,39 \cdot 10^{-3}$ кг. Оставив ту же степень затухания, но, уменьшив, частоту свободных колебаний механического колебательного звена до 300 Гц, получим верхнюю частоту частотного диапазона 100 Гц и массу инерционного тела: $0,16 \cdot 10^{-3}$ кг. Инерционное тело из монокристаллического кремния толщиной 0,38 мм со стороной квадрата 21 мм имеет массу $0,39 \cdot 10^{-3}$ кг, а со стороной квадрата 13,4 мм – массу $0,16 \cdot 10^{-3}$ кг. Размер инерционного тела можно уменьшить, утяжелив его, как это делают в Раменском приборостроительном конструкторском бюро. Проведённые оценки позволяют сделать вывод о том, что есть принципиальная возможность создать по технологии MEMS механическое колебательное звено с верхней частотой частотного диапазона 250 Гц и со спектральной плотностью шума $1 \cdot 10^{-15}$ м²/с⁴/Гц.

Найдём шум второго шумящего звена акселерометра – ёмкостного преобразователя. Как известно [3], у ёмкостного преобразователя потенциальная возможность измерения относительного перемещения инерционного тела и корпуса равна 10^{-14} м. В соответствии с рисунком 3 относительное перемещение инерционного тела и корпуса x_0 в разомкнутой системе равно ускорению корпуса акселерометра $p^2 x_k$, умноженному на передаточные функции ветвей m и e сигнального графа:

$$x_0 = p^2 x_k m e$$

Поставив значение ветви e из формулы (5), найдём приведённое ко входу относительное перемещение инерционного тела и корпуса x_0 ёмкостного преобразователя в виде ускорения корпуса акселерометра $p^2 x_k$:

$$p^2 x_k = k(\tau_0^2 p^2 + 1)x_0 / m = (\tau_0^2 p^2 + 1)\omega_0^2 x_0 \quad (16)$$

В акселерометрах с малым затуханием в рабочем диапазоне частот выражение $(\tau_0^2 p^2 + 1)$ в (16) равно единице. И тогда наименьшее измеряемое ускорение акселерометра с частотой свободных колебаний 1000 Гц будет равно $(2 \pi \cdot 1000)^2 10^{-14}$ м/с² = $4 \cdot 10^{-7}$ м/с². Вычисленное значение ускорения возведём в квадрат и, разделив на полосу частот в 1 Гц, получим: $1,6 \cdot 10^{-13}$ м²/с⁴/Гц (совпадает со спектральной плотностью шума акселерометра DSU3-428). Ёмкостной преобразователь в акселерометре с высокой частотой свободных колебаний, видимо, достиг предела точности измерения относительного перемещения инерционного тела и корпуса и не может обеспечить необходимую спектральную плотность шума.

Чтобы уменьшить спектральную плотность шума ёмкостного преобразователя до уровня техногенного фона Земли необходимо уменьшить частоту свободных колебаний механического колебательного звена. Так снизив эту частоту до 300 Гц, получим частотный диапазон от нуля до 100 Гц и спектральную плотность шума ёмкостного преобразователя $1,3 \cdot 10^{-15}$ м²/с⁴/Гц. Цифровой фильтр с полосой частот от 10 до 100 Гц позволит устранить шум, создаваемый частотами ниже 10 и выше 100 Гц.

Можно расширить частотный диапазон до 250 Гц, сделав эту частоту частотой свободных колебаний механического колебательного звена, и получить спектральную плотность шума ёмкостного преобразователя $6,1 \cdot 10^{-16}$ м²/с⁴/Гц.

Но на этой частоте необходимо обеспечить достаточную степень затухания звена. Как показывает расчёт, проведённый по формуле (14), механическое колебательное звено с частотой свободных колебаний 250 Гц и степенью затухания 0,5 должно иметь неприемлемую для технологии MEMS большую массу инерционного тела в $26 \cdot 10^{-3}$ кг.

Электродинамический сейсмоприёмник ускорения

В настоящее время появилась возможность получить в электродинамическом сейсмоприёмнике SM-11 (или GS-20DH) с помощью цифрового фильтра выходной сигнал, пропорциональный ускорению колебаний изучаемой среды, и АЧХ, согласованную со спектром сейсмических сигналов [6]. В [6] изображена спектральная плотность шума SM-11. На частотах 3 и 300 Гц она находится выше уровня техногенного фона Земли, на частотах 10 и 90 Гц располагается на уровне фона, а в полосе частот от 10 до 90 Гц находится ниже этого уровня, становясь наименьшей ($4 \cdot 10^{-16}$ м²/с⁴/Гц) на частоте свободных колебаний сейсмоприёмника 30 Гц.

Многие же задачи наземной сейсморазведки могут быть решены в частотном диапазоне от 10 до 100 Гц. С целью проверки возможности преобразования выходного сигнала электродинамического сейсмоприёмника SM-11 в выходной сигнал, пропорциональный ускорению колебаний в этом частотном диапазоне и реальному времени, была разработана программа с применением цифрового фильтра "yulewalk". На вход фильтра подавался сигнал в виде синусоиды с линейно возрастающей частотой от 10 до 100 Гц (сweep) и амплитудой, достигающей наибольшего значения на 30 Гц и падающей с крутизной 6 дБ на октаву влево и вправо от 30 Гц. Частота дискретизации сигнала и фильтра составляла 1000 Гц. Применённый фильтр позволяет устанавливать заданные значения частот и амплитуд произвольному количеству точек и получать на его выходе амплитудную характеристику выровненного сигнала с неравномерностью, не превышающей одного процента. При этом спектральная плотность шума начинает линейно возрастать с частоты 90 Гц, превышая техногенный фон, и становится равной $3 \cdot 10^{-15}$ м²/с⁴/Гц на частоте 100 Гц. Если же сейсмические исследования необходимо будет проводить в более широком частотном диапазоне, то спектральная плотность шума вне полосы частот от 10 до 90 Гц будет превышать техногенный фон на величины, приведённые в [6].

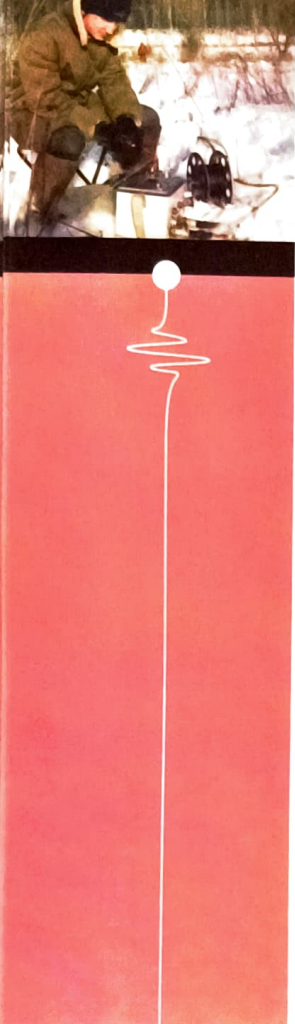
Этот недостаток устранён в разработанном во ВНИИГеофизике опытного образца электродинамического сейсмоприёмника трёхкомпонентных ускорений СТУ с частотным диапазоном от 3 до 250 Гц и спектральной плотностью шума $3 \cdot 10^{-15}$ м²/с⁴/Гц в этом диапазоне [6].

Заключение

Итак, как показал проведённый анализ, ни один из современных компенсационных акселерометров по достигнутым значениям динамического диапазона и спектральной плотности шума не отвечает требованиям наземной сейсморазведки к разрешающей способности приёмников сейсмических сигналов, включающей в себя: пропорциональность выходных сигналов ускорениям колебаний изучаемой среды в частотном диапазоне от 3 до 250 Гц, динамический диапазон в 160 дБ и спектральную плотность шума на уровне техногенного фона Земли, составляющего $1 \cdot 10^{-15}$ м²/с⁴/Гц [6]. Основное назначение этих акселерометров – высокоточное измерение низкочастотных, в том числе и постоянных, ускорений движущихся объектов.



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРО- И СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ



щихся объектов. Это их главное достоинство не используется в сейсморазведке. Полученные же в акселерометрах VectorSeis, SF3000L и DSU3-428 частотные диапазоны от 0 до 1450, от 0 до 1000 и от 0 до 800 Гц, намного шире частотного диапазона, требуемого сейсморазведкой. Такие частотные диапазоны создают излишний большой шум в акселерометрах и его необходимо ограничивать полосовым фильтром с более узким частотным диапазоном.

Выявлена главная причина большой спектральной плотности шума компенсационного акселерометра с высокой частотой свободных колебаний. Это – емкостной преобразователь, применяемый в таком акселерометре на пределе точности измерения относительного перемещения инерционного тела и корпуса. Снизив частоту свободных колебаний до 300 Гц, можно получить частотный диапазон акселерометра от нуля до 100 Гц и спектральную плотность шума емкостного преобразователя $1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}^4/\text{Гц}$.

В настоящее время требования наземной сейсморазведки может выполнить электродинамический сейсмоприёмник SM-11 (или GS-20DH) с выходным сигналом, пропорциональным скорости колебаний и преобразованным цифровым фильтром в выходной сигнал, пропорциональный ускорению колебаний изучаемой среды. Ширина частотного диапазона преобразованного выходного сигнала сейсмоприёмника может быть программно увеличена в зависимости от условий распространения колебаний в геологической среде, но с повышением спектральной плотности шума и уменьшением динамического диапазона 6 дБ на октаву добавляемых участков частотного диапазона.

Возможно, в будущем будет освоено производство электродинамического сейсмоприём-

ника трёхкомпонентных ускорений СТУ, обеспечивающего спектральную плотность шума $3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}^4/\text{Гц}$ в частотном диапазоне от 3 до 250 Гц.

Литература

1. К. Аки, П. Ричардс. Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983.
2. Коновалов С.Ф. и др. Опыт разработки малошумящего акселерометра // Гироскопия и навигация. – 2000. – № 3
3. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин // П. Энергоатомиздат, 1983.
4. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение. – 2007.
5. Рыжов А.В. К теории электродинамического сейсмоприёмника. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2007. – №1.
6. Рыжов А.В. Электродинамические сейсмоприёмники в российской геофизике. // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2008. – №3
7. Селезнёв В.П. Навигационные устройства. – М.: Оборонгиз. – 1974.
8. Синельников А.Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. – М.: Издательство стандартов. – 1979.
9. Теория автоматического управления. Часть 1. Под редакцией Воронова А.А. – М.: Высшая школа. – 1977.
10. Трифонов Н.В. Вопросы построения чувствительной сейсмической аппаратуры. // Сейсмические приборы. – 1988. – Выпуск № 20.
11. Maxwell P., Tessman J., Reichert B. Design through to production of MEMS digital accelerometer for seismic acquisition. // First break. – 2001. – Volume 19.3.

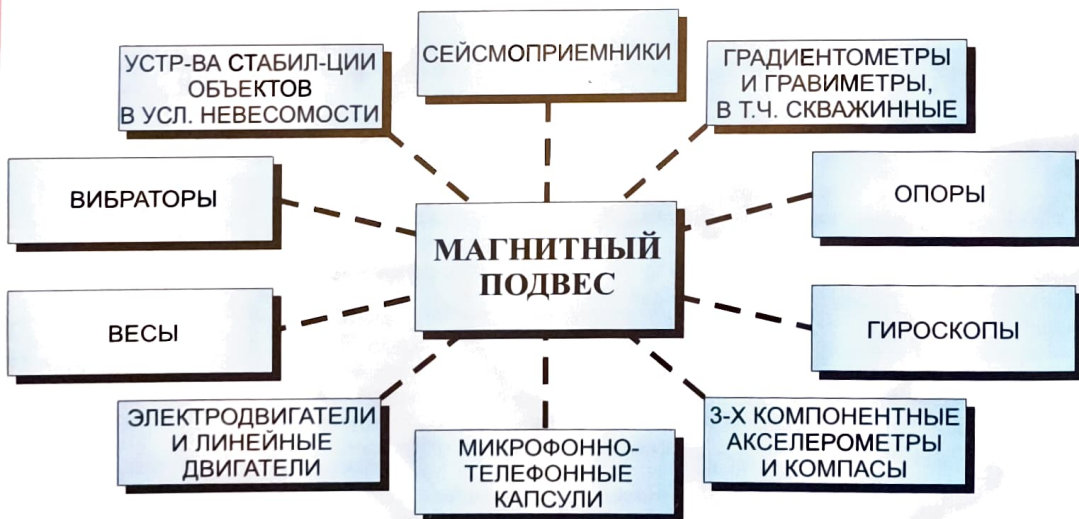


**ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
и ООО "ИОЛА-К" (г.Москва)**

**ПРИГЛАШАЮТ К СОТРУДНИЧЕСТВУ
Организации для проектирования
и серийного производства**

ИОЛА-К

УСТРОЙСТВ НА МАГНИТНЫХ ПОДВЕСАХ



Группой специалистов под руководством д.тех.н., проф. Петрова Ю.П.:

- ✓ разработана оригинальная математическая модель магнитных подвесов;
- ✓ создана методика расчета магнитных цепей;
- ✓ разработаны макеты устройств.

Преимущества устройств на магнитных подвесах:

- ✓ малые геометрические размеры;
- ✓ низкое энергопотребление;
- ✓ широкие функциональные возможности;
- ✓ высокая надежность.

Контактная информация:

тел.: (342) 245-00-35, 242-32-80

(495) 579-35-22

email: amper-master@bk.ru