

9  
АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

*Препринт № 16*

Л. Д. Гик

**МЕТОДЫ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ  
СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ**

L.D. Gik

**METHODS  
OF DETERMINATION  
OF SEISMIC RECEIVERS  
PARAMETERS**

НОВОСИБИРСК 1990

Гик Л.Д. Методы определения параметров сейсмоприемников. Новосибирск, 1990. 44 с. (Препр./ Институт геологии и геофизики СО АН СССР; № 16):

Описаны предложенные автором пути существенного расширения частотного диапазона испытательных виброплатформ, а также пути пространственного изменения вектора вибраций. Изложены результаты усовершенствования немеханических методов испытания сейсмоприемников. Компенсация электрического импеданса позволяет повысить точность измерения частотных характеристик и чувствительности. Метод применим для электродинамических и пьезоэлектрических сейсмоприемников.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся обработкой и интерпретацией сейсмических данных.

The ways of essential broadening the frequency test vibroplatform, as well as, the ways of dimensional change of the vector of vibration, proposed by the author, are described. Results of the improvement of nonmechanical methods of testing seismic receivers are given. The compensation of the electric impedance allows to increase the accuracy of the frequency band method can be applied to electrodynamic and piezoelectric seismic receivers.

## ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоприемники, являющиеся неотъемлемым элементом любого сейсмического аппаратурного комплекса, очень часто по ряду параметров, например частотному диапазону, не полностью удовлетворяют предъявленным к ним требованиям. Кроме того, они обладают сравнительно низкой надежностью. Этот факт заставляет уделять внимание данному элементу сейсмической аппаратуры. Совершенствование и контроль сейсмоприемников требуют наличия соответствующих испытательных средств.

В технике измерения механических колебаний в качестве испытательных устройств чаще всего находят применение электродинамические вибростенды /1/, представляющие собой жестко связанную с фундаментом магнитную систему, в зазоре которой упруго подвешена рабочая катушка, несущая вибрационную платформу с укрепленным на ней объектом испытаний. При протекании электрического тока через катушку (обычно используется ток гармонической формы, частота которого изменяется в требуемом диапазоне) возбуждается вибрация платформы. Контроль амплитуды вибраций осуществляется оптическими средствами или специальными эталонными электрическими измерительными устройствами, которые серийно выпускаются промышленностью. Однако в сейсмике они не получили широкого применения. Причиной этого являются их громоздкость, дороговизна, необходимость в помещениях специального типа, а также незащищенность от внешних вибраций.

В сейсморазведочной аппаратуре получили распространение небольшие по габаритам и весу импульсные вибростенды, предназначенные для сравнения отклика на ударный сигнал испытуемого и образцового сейсмоприемников. Для измерения абсолютных, а не относительных характеристик сейсмоприемников такой метод оказывается неудобным и для этих целей практически не используется.

Для всестороннего исследования свойств сейсмоприемников рациональным оказывается инерционный тип испытательных виброплатформ с электродинамическим возбуждением, предложенный Ю.В.Ризниченко /2/ и реализованный И.П.Пасечником /3/. Представляется, что развитие прямых средств испытания приемных элементов сейсмической аппаратуры (которые вызывают вибрационное воздействие на корпус прибора) нужно вести именно по этому принципу с внесе-

нием некоторых совершенствований, обусловливаемых требованиями сегодняшнего дня. Главные из них, на наш взгляд, это обеспечение широкого частотного диапазона испытаний в требуемом виде режима. Для сейсмике чаще всего требуется, во-первых, режим постоянства колебательной скорости (в сейсморазведке) и во-вторых, режим постоянства колебательных смещений (в сейсмологии). К сожалению, вибростенд И.П.Пасечника в основной области частотной характеристики обеспечивает режим постоянства колебательных ускорений; осуществление других режимов требует неудобных пересчетов и регулировок. Кроме того, совершенствование должно обеспечить возможность изменения в произвольном направлении пространственной ориентации вектора генерируемых колебаний, а также реализовать не только поступательные, но и ротационные (угловые) колебания.

Прямой способ контроля сейсмоприемников позволяет осуществить определение всех их параметров, а именно - чувствительности и линейности, частотной характеристики, устойчивости к паразитным воздействиям, как например, боковым и ротационным колебаниям, а также ряд других. Однако в сейсмике не меньшее практическое значение, благодаря своей технической простоте, приобретают косвенные методы испытаний, использующие электрическое, а не механическое испытательное воздействие. Эти методы способны определить наиболее важные (хотя и не все) характеристики сейсмоприемников.

Следует также учесть, что не все характеристики сейсмоприемников приходится определять одинаково часто. Так, чувствительность и собственную частоту в разведочной аппаратуре желательно определять перед каждым циклом работы как индикаторы исправности, в особенности при использовании низкочастотных сейсмоприемников. Частоту установочного резонанса нужно измерять значительно реже - в особо ответственных случаях высокочастотных измерений; степень успокоения (коэффициент демпфирования), высшие резонансы пружин, боковую и ротационную чувствительность, по-видимому, имеет смысл определять только при создании новых образцов. Отсюда следует, что арсенал средств испытания сейсмоприемников целесообразно расширять с учетом как достигаемых возможностей, так и возникающих затрат.

Прямой метод испытания электродинамических сейсмоприемников.  
Сначала рассмотрим пути решения задачи генерации в широком диа-

пазоне частот требуемого вида испытательного воздействия. Пусть вибрационная испытательная платформа массой  $m_{II}$  подвешена на пружинах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  к некоторому фундаменту (или массивному основанию)  $\Phi$  (рис.1). На платформе установлены испытуемый сейсмоприемник СП и электродинамический возбудитель колебаний, который схематически изображен в виде постоянного магнита (полюсы N и S), индуктивной катушки с массой  $m_B$ , подвешенной к магниту на пружине с жесткостью  $w_B$ .

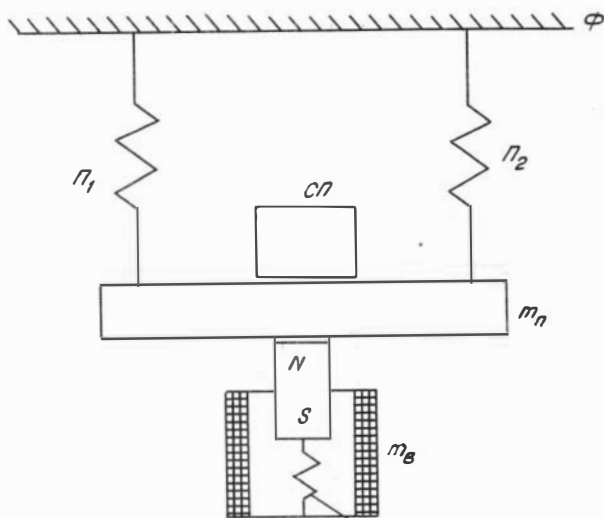


Рис.1.

Пусть через индуктивную катушку возбудителя пропускается гармонический ток с амплитудой  $I_B$  и частотой  $\omega$ . Это вызовет приложение к массе  $m_B$  силы  $F_B = S \dot{u} I_B$ ; здесь  $S \dot{u} = B l$  - чувствительность сейсмоприемника,  $B$  - магнитная индукция,  $l$  - полная длина провода индуктивной катушки. Под влиянием этой силы масса сейсмической системы  $m_B$  придет в движение с колебательной скоростью

$$\dot{u}_B = \frac{F_B}{Z_B} = \frac{F_B}{h_B + j\omega m_B + w_B/j\omega} \approx \begin{cases} j\omega F_B/w_B & \text{при } \omega \ll \omega_B \\ F_B/j\omega m_B & \text{при } \omega \gg \omega_B \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega_B = \sqrt{w_B/m_B}$  - собственная частота возбудителя. Здесь в целях упрощения аналитических выражений мы предполагаем, что масса возбудителя  $m_B$  пренебрежимо мала в сравнении с массой платформы  $m_{II}$ .

Примем, как это обычно и бывает, что частота возбуждения  $\omega$  намного выше частоты собственных колебаний вибрационной платформы  $\omega_{II} = \sqrt{w_{II}/m_{II}}$ , где  $w_{II}$  - суммарная жесткость пружин подвески платформы  $II_1$  и  $II_2$ . В этом случае при движении платформы под влиянием действия возбудителя можно пренебречь силой реакции пружин  $w_{II}$ . Это значит, что общий центр масс  $m_{II}$  и  $m_B$  можно считать неподвижным. Отсюда следует

$$\dot{u}_n = \dot{u}_B \frac{m_B}{m_n} = \begin{cases} \frac{S \dot{u} I_B}{m_n \omega_B^2} (j\omega) & \text{при } \omega \ll \omega_B, \\ \frac{S \dot{u} I}{m_n} \cdot \frac{1}{j\omega} & \text{при } \omega \gg \omega_B. \end{cases} \quad (2)$$

При оптимальном успокоении (несколько менее критической величины  $h_B = 2\sqrt{w_B m_B}$ ) знаки неравенств в выражении (2) заменяются с  $\ll$  и  $\gg$  на  $\leq$  и  $\geq /4/$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что устройство, показанное на рис.1, обеспечивает режим испытаний с постоянным колебательным смещением в диапазоне частот ниже резонанса возбудителя и режим с постоянным ускорением в более высоком диапазоне частот.

При испытании сейсморазведочных сейсмоприемников наиболее удобным является режим постоянства колебательных скоростей. Такую задачу в применении к устройству, изображенному на рис.1, можно решать на основе методов электрической коррекции /4,5/. Для этого нужно между звуковым генератором и сейсмоприемником-возбудителем включить показанный на рис.2 корректирующий четырехполосник  $R_1-R_2-C_1-C_2$ . Последний представляет собой сочетание интегрирующей ( $R_1-C_2$ ) и дифференцирующей ( $C_1-R_2$ ) цепочек, работающих на общую нагрузку (катушку возбудителя). Импедансы интегрирующей цепи выбираются ниже импедансов дифференцирующей цепи, чем обеспечивается возможность совместного функционирования этих цепочек. Резистивная добавка в цепь интегрирования (нижняя часть сопротивления  $R_2$ ) обеспечивает согласование корректирую-

щей схемы и сейсмоприемника вблизи частоты резонанса последнего.

Схема (рис. 2) фактически обеспечивает плавное ослабление интегрирующим звеном  $R_1-C_2$  входного сигнала, начиная от некоторой нижней граничной частоты корректируемого частотного диапазона  $f_H$  вплоть до частоты резонанса возбудителя  $f_B$ , а также ослабление обратно пропорционально частоте верхних частот от частоты резонанса  $f_B$  до верхней границы корректируемого частотного диапазона  $f_M$ . Как показано в /5/, частотная характеристика схемы коррекции описывается соотношением:

$$v_k = \frac{1 - (\omega_B/\omega)^2 - j2\beta_B\omega_B/\omega}{1 - (\omega_B/\omega)^2 - j2\beta_2\omega_B/\omega}$$

Здесь  $\beta_B$  - степень успокоения корректируемого сейсмоприемника, а  $\beta_2$  - степень успокоения, достигаемая при коррекции. В результате действия данной схемы реализуется условие  $\beta_2 \gg \beta_B$ . Как показано в /4,5/,  $\beta_2 = f_B/f_H = f_M/f_B$ .

Из сказанного выше становится понятным, что интегрируя сигнал в дорезонансной области (ослабляя его пропорционально частоте), мы вместо режима постоянства уровня колебательных смещений обеспечиваем режим постоянства колебательных скоростей. Аналогичная ситуация имеет место в послерезонансной области, где дифференцирование сигнала означает подъем его уровня пропорционально частоте, и, следовательно, перевод режима постоянства колебательных ускорений в режим постоянных колебательных скоростей.

При испытании сейсмологических приборов желателен режим постоянства колебательных смещений, т.е. режим  $\omega \ll \omega_B$ . Поэтому задача расширения частотного диапазона в данном случае сводится к повышению собственной частоты возбудителя  $\omega_B$ . Известно, что высокочастотные электродинамические сейсмоприемники применяются редко. Поэтому представляет интерес использование электрической коррекции в данном случае, т.е. для повышения параметра  $\omega_B$  за те пределы, превзойти которые механическими средствами оказывается

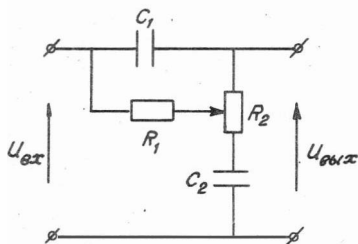


Рис. 2.

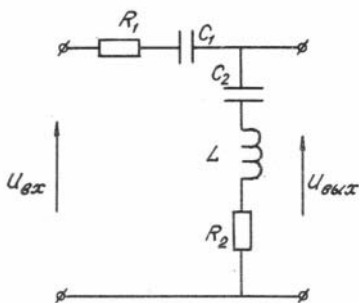


Рис.3.

затруднительным. На рис.3 приведена схема электрической коррекции, повышающая собственную частоту сейсмической системы /4,5/. Включение этой схемы между задающим электрическим генератором и электродинамическим сейсмическим возбудителем эквивалентно использованию более высокочастотного сейсмоприемника, что фактически и означает расширение частотного диапазона, в котором генерируются

колебательные смещения постоянной амплитуды.

Теперь рассмотрим пути решения задачи изменения пространственного направления вектора генерируемых колебаний. На рис. 4 показана конструктивная схема устройства, разработанного для этой цели в ИГиГ СО АН СССР. Жесткая вибрационная платформа ВП массой  $m_{\Pi}$  подвешена на пружинах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , имеющих суммарную жесткость  $w_{\Pi}$ , к фундаменту (опоре) Ф. Вблизи центра платформы укреплен испытуемый сейсмоприемник СП и уравновешивающая масса УМ. Назначение последней сохранить неизменным положение центра массы платформы при укреплении на ней испытуемого сейсмоприемника. Возбудители в виде электродинамических сейсмоприемников размещены парами в диаметрально противоположных точках платформы так, чтобы центр расстояния между ними совпадал с центром массы платформы. Ось чувствительности каждой пары направлена вдоль одной из осей декартовой системы координат  $x, y, z$ . В направлении каждой оси может быть включено  $N$  пар возбудителей. В этом случае при синфазном включении одной пары для определения движения платформы можно пользоваться выражением (2), учтя коэффициент увеличения  $2N$ . Одновременное возбуждение каждого компонентного элемента с весовыми множителями  $\eta_x, \eta_y$  и  $\eta_z$  позволяет сформировать возбуждающее силовое воздействие, которое в векторной форме можно записать

$$\hat{F} = 2NF_B(i\eta_x + j\eta_y + k\eta_z).$$

Как видно, изменяя каждый из весовых множителей  $\eta$  в диапазоне от нуля до единицы, можно как угодно ориентировать в простран-



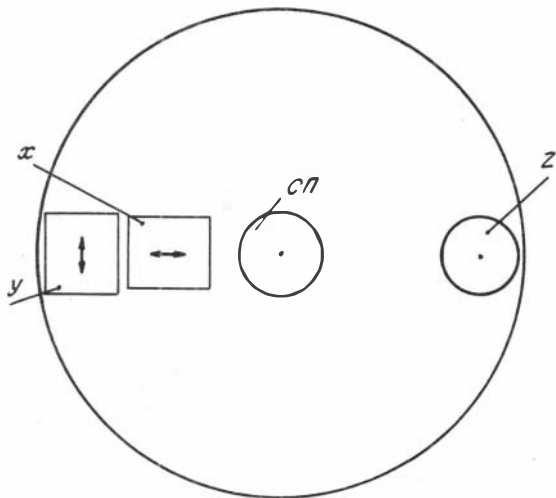
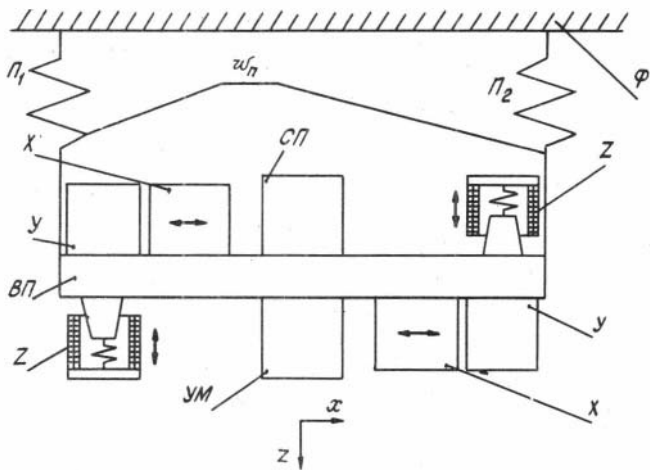


Рис.4.

ве вектор возбуждающей силы, а значит, и направление колебательного движения.

Противофазное включение некоторой пары сейсмических возбуждателей позволит образовать пару сил, а значит, и генерировать вращательное движение платформы. При этом для осуществления дви-

жения в вертикальной плоскости следует использовать пару сейсмоприемников, ориентированных в направлении оси  $z$ , а для осуществления движения в горизонтальной плоскости — любую пару, ориентированную в направлении оси  $x$  или  $y$ .

Приведем количественные оценки. В опытном макете в качестве сейсмических возбудителей были использованы четыре серийных сейсмоприемника с собственной частотой  $f_B = 30$  Гц, чувствительностью  $s_u = 15$  В·с/м и массой сейсмической системы  $m_B$  около 20 г. Вибрационная платформа была подвешена на резиновых шнурах, жесткость которых была подобрана так, чтобы при суммарной массе вибрационной платформы, имевшей в зависимости от нагрузки величину  $5+10$  кг, растяжение пружин составляло  $z_0 = 0,25+0,5$  м. Этому соответствует собственная частота  $f_{II} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g/z_0} = (1+0,7)$  Гц, здесь  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение силы тяжести. Допустимый свободный ход при движении массы имел величину  $u_{B,max} = 1$  мм. Поэтому максимальная амплитуда колебаний вибрационной платформы достигала величины порядка

$$u_{n,max} = u_{B,max} \frac{2Nm_B}{m_n} = 10 \text{ мкм},$$

что вполне достаточно при испытании низкочастотных сейсмографов и сейсмоприемников.

В диапазоне частот выше резонанса возбудителя, где использованный принцип действия обеспечивает режим испытаний, соответствующий постоянству колебательных ускорений, предельные амплитуды ускорения определяются следующими соотношениями. Максимальный уровень возбуждающей силы ограничивается тепловыми нагрузками в катушке сейсмоприемников. Принимая с некоторым запасом эту мощность равной  $P_{max} = 2$  Вт для электрического сопротивления катушки  $R_B = 200$  Ом, получаем, что ток возбуждения не должен превышать величину  $I_{max} = \sqrt{P_{max}/R_B} = 0,1$  А. Такому току соответствует сила  $F_B = s_u I_{max} = 1,5$  Н, под воздействием которой масса возбудителя придет в движение с ускорением  $\ddot{u}_{B,max} = F_B/m_B = 75$  м/с<sup>2</sup>. Следует, однако, оговорить, что такой режим ввиду ограниченности свободного хода массы может быть реализован только на частотах выше 50 Гц, когда максимальная величина колебательного смещения, соответствующая ускорению  $\ddot{u}_{max}$ , не превышает допустимую величину  $u_{max} = 1$  мм. В результате получаем, что максималь-

но реализуемая величина ускорения вибрационной платформы имеет порядок

$$\ddot{u}_{п, \max} = \ddot{u}_{в, \max} N m_{в} / m_{п} \approx 0,8 \text{ м/с}^2,$$

что можно признать вполне достаточным.

Укажем на возможность увеличения амплитуды колебательных смещений в дорезонансной частотной области возбуждающих сейсмоприемников путем конструктивного изменения возбуждателя. В большинстве известных сейсмоприемников роль сейсмической массы отводится сравнительно легкой катушке, а тяжелая магнитная система (постоянный магнит и магнитопровод) жестко связывается с корпусом сейсмоприемника. В то же время при существующей величине чувствительности сейсмоприемника  $e_{ц} = 20+30 \text{ В}\cdot\text{с/м}$  электрической мощности возбуждения в 2-3 Вт вполне достаточно для приведения в колебательное движение амплитудой в 1 мм массы магнитной системы, обратив сейсмоприемник так, чтобы связать с внешним объектом не корпус, а катушку. При этом роль сейсмической массы будет играть магнитная система. Поскольку масса последней примерно на порядок превышает массу катушки, то такой путь дает возможность соответственно на порядок поднять и амплитуду колебательных смещений вибрационной платформы. Наиболее просто реализовать данный конструктивный вариант у сейсмоприемников, имеющих высокую частоту резонанса сейсмической системы - 50-70 Гц и более. В этом случае даже не потребуется переделки упругих элементов сейсмоприемника.

При определении чувствительности на вибростендах необходимо точное измерение малых вибрационных смещений. Чувствительности оптических средств здесь часто оказывается недостаточно. Рациональнее при решении данной задачи использовать метод взаимности, основанный на свойстве обратимости электродинамических сейсмоприемников.

Рассмотрим схему показанной на рис. I вибрационной платформы. Отличие, однако, заключается в том, что на платформе установлены не два, а три электродинамических сейсмоприемника: испытуемый (№ I) и два вспомогательных (№ 2 и 3). Необходимо провести два опыта. В первом - сейсмоприемник № 2 используется в качестве возбуждателя, а сейсмоприемник № I - по своему прямому назначению. Примем, что частота возбуждающего тока находится выше не

только частот резонанса платформы  $\omega_{\Pi}$ , но и сейсмоприемников  $\omega_i$ , где  $i = 1, 2, 3$ . В этом случае при пропускании через 2-й сейсмоприемник электрического тока  $I \cos \omega t$  на виброплатформу начинает действовать сила с амплитудой  $F_2 = s_{\dot{u}}'' I$  (здесь  $s_{\dot{u}}''$  - чувствительность 2-го сейсмоприемника). Под влиянием этой силы возникает колебательное движение платформы со скоростью  $\dot{u}_{\Pi} = F_2 / \omega m_{\Pi}$  (здесь  $m_{\Pi}$  - суммарная масса платформы и установленных на ней объектов). В результате в испытуемом сейсмоприемнике возбудится электрическое напряжение

$$U_1 = s'_{\dot{u}} \dot{u}_{\Pi} = s'_{\dot{u}} s''_{\dot{u}} I / \omega m_{\Pi}, \quad (3)$$

где  $s'_{\dot{u}}$  - чувствительность сейсмоприемника № 1. Теперь нужно провести второй опыт, используя в качестве возбудителя третий сейсмоприемник, а первые два - по своему прямому назначению - в качестве приемников. В этом случае под влиянием колебательной скорости  $\dot{u}_3$  (величина которой не является существенной), в 1-м и 2-м сейсмоприемниках возникнут сигналы  $U_1' = s_{\dot{u}}' u_3$  и  $U_2' = s_{\dot{u}}' u_3$ . Из этих двух равенств определяется относительная величина чувствительности  $s_{\dot{u}}'' = s_{\dot{u}}' U_2' / U_1'$ . Подставляя значение отношения  $s_{\dot{u}}'' / s_{\dot{u}}'$  в (3), находим интересующую нас величину чувствительности первого сейсмоприемника

$$s'_{\dot{u}} = \sqrt{\frac{U_1}{I} \cdot \frac{U_2'}{U_1'}} \omega m_{\Pi}. \quad (4)$$

В частном случае наличия двух идентичных сейсмоприемников (в сейсмике это обычное явление), когда в пределах допустимой погрешности можно положить  $U_1' / U_2' = 1$ , надобность во втором опыте и в дополнительном сейсмоприемнике № 3 отпадает. Здесь в результате проведения первого опыта чувствительность определяется по формуле (4).

#### Прямой метод испытания пьезоэлектрических сейсмоприемников.

При испытании пьезоэлектрических сейсмоприемников можно воспользоваться изложенной выше методикой, основанной на применении электродинамических преобразователей. Однако иногда может быть полезен вариант устройства, использующего только пьезоэлектрические преобразователи. Покажем удобный путь определения чувствительности пьезоэлектрических сейсмоприемников по методу взаимности.

Пусть имеется вибрационная платформа, для которой частота резонанса упругой подвески  $\omega_{\Pi}$  лежит ниже частотного диапазона испытаний. На платформе установлены два сейсмоприемника, обладающие чувствительностями по ускорению: первый -  $s_{\ddot{u}}^I = U_1/\ddot{u}_1$  и второй -  $s_{\ddot{u}}^{II} = U_2/\ddot{u}_2$ , а по смещению соответственно  $s_u^I = U_1/u_1$  и  $s_u^{II} = U_2/u_2$ . Здесь  $U_1$  и  $U_2$  - выходные электрические сигналы, а  $\ddot{u}_1, \ddot{u}_2, u_1$  и  $u_2$  - соответственно входные ускорения и смещения для первого и второго сейсмоприемников. Возможен пересчет чувствительностей согласно соотношениям  $s_u^I = s_{\ddot{u}}^I \omega_{01}^2$  и  $s_u^{II} = s_{\ddot{u}}^{II} \omega_{02}^2$ . Здесь  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$  - собственные частоты первого и второго сейсмоприемников.

При пропускании через первый сейсмоприемник гармонического тока  $I_1 \cos \omega t$  (при условии  $\omega_{\Pi} \ll \omega \ll \omega_{01}$ ) на пьезоэлемент начинает действовать сила с амплитудой  $F_1 = s_u^I q_1$ . Здесь  $q_1 = \int I_1 dt$  - электрический заряд, прикладываемый к преобразователю. Под влиянием этой силы масса  $m_1$  первого сейсмоприемника (которую считаем пренебрежимо малой в сравнении с массой вибрационной платформы) приходит в движение с амплитудой  $u_1 = F_1/w_1 = F_1/m_1 \cdot \omega_{01}^2$  (здесь  $w_1$  - жесткость пьезоэлемента). Движение массы  $m_1$  вызовет соответствующее движение платформы с амплитудой

$$u_{\Pi} = u_1 m_1 / m_{\Pi} = s_u^I I_1 m_1 / \omega w_1 m_{\Pi}.$$

Движение платформы приведет к появлению электрического сигнала во втором сейсмоприемнике

$$U_2 = s_{\ddot{u}}^{II} \ddot{u}_{\Pi} = s_{\ddot{u}}^{II} \omega s_u^I I / m_{\Pi},$$

откуда

$$\sqrt{s_u^I s_{\ddot{u}}^{II}} = \sqrt{\frac{U_2}{I_1} \cdot \frac{m_{\Pi}}{\omega}}. \quad (5)$$

При идентичных сейсмоприемниках, когда можно считать  $s_u^I = s_u^{II}$ , чувствительность по ускорению определяется из (5). При разных параметрах  $s_{\ddot{u}}^I$  и  $s_{\ddot{u}}^{II}$  можно воспользоваться третьим сейсмоприемником и дополнительным опытом, чтобы отдельно определить чувствительности  $s_{\ddot{u}}^I$  и  $s_{\ddot{u}}^{II}$ , как это было проделано при испытании электродинамических сейсмоприемников.

Косвенные методы испытаний электродинамических сейсмоприемников. Теперь обратимся к косвенным методам испытаний, осуществляемым путем электрического, а не механического воздействия на

сейсмоприемник. Принципиальную возможность определения характеристик электродинамических сейсмоприемников по их реакции на гармонический электрический сигнал можно считать общеизвестным фактом /6,7/. Эти методы стали широко использоваться как средства, позволяющие определять собственную частоту и коэффициент затухания сейсмоприемников /8,9/. Следует, однако, заметить, что определение первого из этих параметров по фазовой характеристике без учета реактивных компонент электрического импеданса рабочей катушки, а второго – по затуханию колебательного процесса сейсмической системы – не обеспечивает желаемой точности. Что же касается измерения чувствительности по двум частотам электромеханического резонанса /7/, то ввиду сложности расчетов и трудности обеспечения достаточной точности этот метод фактически не получил признания.

Главной причиной, ограничивающей широкое применение метода испытаний электродинамических сейсмоприемников путем гармонического воздействия на их электрический вход, является трудность учета реактивной составляющей импеданса рабочей катушки. Поскольку в настоящее время в разведочной геофизике получили распространение катушки с электропроводящим каркасом, представляющим собой короткозамкнутый высокопроводящий виток, то соотношения для импеданса имеют непростой характер. И хотя в природу этого импеданса в значительной степени внесена ясность, сложность его определения тормозит развитие данного метода. Здесь уместно сделать пояснение. При использовании сейсмоприемника по своему прямому назначению влияние реактивной компоненты его электрического импеданса обычно сводится к пренебрежимо малой величине за счет достаточно большой величины входного импеданса электрической схемы регистрации. Это является причиной того, что на практике индуктивная компонента электрического импеданса обычно не представляет интереса. Однако в случае проведения косвенных испытаний пренебречь данным параметром не удастся.

Видимо, по этой причине стал развиваться другой метод – косвенных испытаний электродинамических сейсмоприемников путем воздействия на их вход импульсным электрическим сигналом, вызывающим возмущение подвижной системы. Реакция измеряется по окончании действия возмущающего импульса. Таким путем действие электромеханического и чисто электрического сигналов удается разде-

лить во времени. Первоначально такой путь был использован только для определения чувствительности, затем он был развит и для измерения собственной частоты /10/. На основании использования этого метода серийно выпускается прибор для измерения собственной частоты, относительной чувствительности и затухания электродинамических сейсмоприемников. Ниже будет показано, что как сам метод, так и реализованный на его основе прибор обладают принципиальными недостатками. Поэтому можно сделать вывод, что состояние метода испытаний электродинамических сейсмоприемников путем воздействия на его электрический вход пока не соответствует современным требованиям. Учитывая техническую простоту и некоторые другие достоинства чисто электрических средств испытания, работу по совершенствованию этого метода целесообразно продолжить. Что же касается испытания пьезоэлектрических сейсмоприемников путем воздействия на их электрический вход, то этот вопрос в геофизике фактически не ставился, хотя в технической дефектоскопии /11/ такой путь находит применение. Между тем, приемники сейсмических сигналов с пьезоэлектрическими преобразователями широко используются в морской и находят отдельное применение в наземной сейсморазведке. Поэтому вопрос об оптимизации их испытания заслуживает внимания.

Следует оговорить, что возможности метода косвенных испытаний не ограничиваются тремя названными параметрами. Известно /7, 9/ (и это будет дополнительно показано ниже), что таким путем можно быстро и удобно определять частотную характеристику сейсмоприемника в широкой частотной полосе, что, в частности, дает возможность выявить частотные искажения, вызванные резонансом пружин. Это имеет смысл в применении к низкочастотным маятниковым сейсмоприемникам.

Возможность испытания электродинамических сейсмоприемников путем воздействия на их электрический вход вытекает из свойства обратимости. Покажем это, рассмотрев упрощенную схему электродинамического сейсмоприемника (рис.5). Рабочая катушка  $K$ , играющая также роль инерционного элемента с массой  $m$ , упруго- посредством пружины  $w$  - связана с магнитной системой  $M$ ; последняя обычно составляет одно целое с корпусом сейсмоприемника.

Для описания процессов в таком устройстве воспользуемся выражением для полного электрического импеданса электродинамического преобразователя /12/:

$$\hat{Z} = \hat{Z}_э + s_{\dot{u}}^2 / \hat{Z}_M. \quad (6)$$

Здесь  $\hat{Z}_э$  и  $\hat{Z}_M$  — комплексные величины собственных сопротивлений с электрической и механической сторон. В применении к сейсмоприемнику с электродинамическим преобразователем имеем /4/

$$\hat{Z}_M = h + j\omega m + \frac{w}{j\omega} = \omega_0 m (2\beta + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})) \quad (7)$$

Здесь  $m, w$  и  $h$  — масса, упругость и коэффициент демпфирования

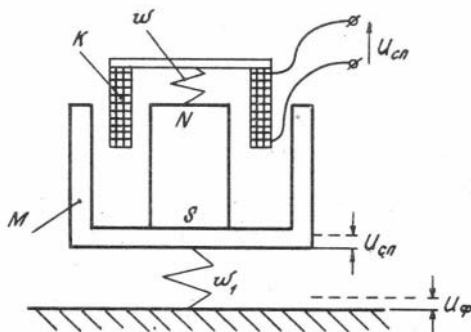


Рис.5.

сейсмической системы,  $\omega_0 = \sqrt{w/m}$  — собственная частота,  $\beta = h/2\sqrt{wm}$  — степень успокоения и  $j = \sqrt{-1}$ . В выражениях (6) и (7) пренебрегаем высшими резонансами пружин, конечностью массы корпуса сейсмоприемника и упругостью его связи с подставкой  $w_1$ . При жестком креплении корпуса сейсмоприемника к жесткой и значительной массе два последних условия выполняются.

Из выражений (6) и (7) можно видеть, что если бы можно было исключить импеданс  $\hat{Z}_э$ , то было бы возможным просто и удобно измерить основные три параметра  $\omega_0, \beta$  и  $s_{\dot{u}}$ , определяющие главные свойства сейсмоприемника. Действительно, полагая, что частота возбуждающего тока  $\omega$  плавно изменяется в нужном диапазоне, и считая нулевой фазу питающего тока  $I$  (пренебрегая падением напряжения на  $\hat{Z}_э$ ), соотношения для электрических параметров можно представить:

$$\hat{U} = s_{\dot{u}} \dot{x} = s_{\dot{u}} F / \hat{Z}_M = s_{\dot{u}}^2 I / \hat{Z}_M,$$

или

$$\hat{U} / I = \frac{s_{\dot{u}}^2}{m(2\beta\omega_0 + j(\omega - \omega_0^2/\omega))}, \quad (8)$$

где  $\hat{U}$  — комплексная величина электрического напряжения на сейсмоприемнике;  $F$  — сила, действующая на катушку  $K$ ;  $\dot{x}$  — колебательная скорость движения катушки.



Выражение (8) подсказывает простой и удобный способ определения параметра  $\omega_0$  - фазометрический. Действительно, при  $\omega = \omega_0$  имеет место  $\text{Im}(U/I) = 0$ , т.е. реактивная компонента выражения (8) обращается в ноль. Таким образом, собственную частоту сейсмоприемника  $\omega_0$  можно найти, используя фазометр в качестве ноль-индикатора.

Покажем возможность простого и удобного способа определения степени успокоения. Рассмотрим случай малого отклонения частоты возбуждаемого тока от частоты резонанса сейсмической системы.

Введем обозначения  $\delta\omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \ll 1$ . Подставляя значение  $\delta\omega$  в (7) и пренебрегая  $(\delta\omega)^2$  в сравнении с  $\delta\omega$ , получаем выражение в комплексной форме для электромеханического импеданса сейсмоприемника

$$\hat{Z}_{\text{ЭМ}}(\delta\omega) = \frac{U(\delta\omega)}{I(\delta\omega)} = \frac{S_u^2}{m\omega_0(\beta + j\delta\omega)}$$

или для модуля комплексной величины

$$|Z_{\text{ЭМ}}(\delta\omega)| = \frac{S_u^2}{m\omega_0\beta/\sin\varphi}.$$

Здесь  $\varphi = \text{arctg}(\delta\omega/\beta)$  - фазовый сдвиг напряжения  $U$  на выходе сейсмоприемника по отношению к возбуждающему току  $I$ . Таким образом,

$$\beta = -\delta\omega \text{ctg} \varphi. \quad (9)$$

Существенное отличие способа определения параметра  $\beta$  от способа определения параметра  $\omega_0$  проявляется в том, что здесь требуется диапазонное фазометрическое устройство, а не ноль-индикатор фазового сдвига, вследствие чего точность определения  $\beta$  будет зависеть от точности используемого фазометра. Можно, однако, заметить, что к точности определения степени успокоения  $\beta$  обычно предъявляются меньшие требования, чем к точности определения собственной частоты  $\omega_0$ . Впрочем, в случае необходимости могут быть использованы современные цифровые фазометры повышенной точности.

Для определения чувствительности  $s_u^1$  по выражению (8) нужно знать величину сейсмической массы  $m$ . В этом случае на основании выражения (9) можно записать

$$s_{\dot{u}}^4 = m^2 \left( \frac{U(\omega)}{I(\omega)} \right)^2 \left( (2\beta\omega_0)^2 + \omega^2 \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right)^2 \right), \quad (I0)$$

при  $\omega \gg \omega_0$  справедливо некоторое упрощение

$$s_{\dot{u}} \approx \sqrt{\frac{U(\omega)}{I(\omega)} m \left( \omega \left( 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \right) + \frac{2(\beta\omega_0)^2}{1 - \omega_0^2/\omega^2} \right)} \approx \sqrt{\frac{U(\omega)}{I(\omega)}} m \omega. \quad (II)$$

Если в процессе испытания выполняется точное измерение степени успокоения  $\beta$ , то определение чувствительности можно провести на частоте резонанса. При этом выражение (I0) упрощается:

$$s_{\dot{u}} = \sqrt{\frac{U(\omega_0)}{I(\omega_0)} \cdot 2\beta\omega_0 m}. \quad (I2)$$

В связи с последним соотношением представляет интерес рассмотрение частного случая, когда в электродинамическом сейсмоприемнике используется индуктивная катушка с неэлектропроводящим каркасом, имеющая внутреннее сопротивление  $R_K$  и замкнутая на некоторый резистор  $R_{III}$ . В этом случае, пренебрегая всеми причинами демпфирования, кроме электромагнитного, на основании выражения (7) степень успокоения можно выразить:

$$2\beta = \frac{h}{m\omega_0} = \frac{F_h}{m\omega_0\dot{u}} = \frac{s_{\dot{u}}^2}{m\omega_0(R_K + R_{III})}.$$

Отсюда следует, что, зная из предыдущих измерений  $\omega_0$ ,  $2\beta$  и  $m$  и определив (даже на постоянном токе) суммарное резистивное сопротивление в цепи индуктивной катушки  $R_K + R_{III}$ , можно вычислить чувствительность по соотношению

$$s_{\dot{u}} = \sqrt{2\beta\omega_0 m (R_K + R_{III})},$$

которое совпадает с (I2) при  $U(\omega_0)/I(\omega_0) = R_K + R_{III}$ . На основании последнего соотношения можно сделать любопытный вывод: электромеханический импеданс данного типа сейсмоприемника на собственной частоте  $\omega_0$  (в пределах указанных допущений) не зависит от чувствительности  $s_{\dot{u}}$ . Физически это можно объяснить так. При изменении, например увеличении, чувствительности  $s_{\dot{u}}$ , электрический сигнал, вызванный движением индуктивной катушки, происходящим под влиянием возбуждающего тока  $I$ , возрастает. Однако (при

постоянстве тока  $I$ ) рост чувствительности  $s_{\dot{u}}$  ведет и к росту успокоения, а значит, и уменьшению скорости движения катушки, что полностью компенсирует первый эффект.

Таким образом, в случае возможности точного измерения параметра  $\hat{z}_{\text{ЭМ}} = \hat{U}/\hat{I} \mid z_{\text{Э}} \rightarrow 0$  задача определения искомых параметров  $\omega_0$ ,  $\beta$  и  $s_{\dot{u}}$  решается легко. Фактически это сводит проблему удобного измерения параметров сейсмоприемника к устранению влияния собственного импеданса  $z_{\text{Э}}$ . Для того, чтобы показать возможность успешного решения данной задачи, необходимо уточнить вслед за авторами работ /7,9/ эквивалентную электрическую схему сейсмоприемника. Представим выражение (8) в виде

$$\frac{1}{\hat{z}_{\text{ЭМ}}} = \frac{\hat{I}}{\hat{U}} = \frac{2\beta\omega_0 m}{s_{\dot{u}}^2} + j \frac{\omega m}{s_{\dot{u}}^2} + \frac{\omega_0^2 m}{j\omega s_{\dot{u}}^2} \quad (13)$$

В такой записи наглядно видно, что комплексный электрический импеданс  $\hat{z}_{\text{ЭМ}}$  эквивалентен (рис.6) параллельному соединению трех импедансов: индуктивного  $x_L = j\omega L_{\text{ЭМ}}$ , резистивного  $R_{\text{ЭМ}}$  и емкостного  $x_C = 1/j\omega C_{\text{ЭМ}}$ , что находится в соответствии с /7/. Числовые значения параметров электромеханического импеданса, как это следует из (13), оказываются равными

$$R_{\text{ЭМ}} = \frac{s_{\dot{u}}^2}{2\beta\omega_0 m}, \quad C_{\text{ЭМ}} = \frac{m}{s_{\dot{u}}^2} \quad \text{и} \quad L_{\text{ЭМ}} = \frac{s_{\dot{u}}^2}{\omega_0^2 m} = \frac{s_{\dot{u}}^2}{2\omega} \quad (14)$$

Теперь обратимся к чисто электрическому импедансу - параметру  $\hat{z}_{\text{Э}}$ . В работе /7/ этот параметр представлен как последовательное соединение резистора  $R_{\text{Э}}$  и линейной индуктивности  $L_{\text{Э}}$ . Такое приближение может быть оправдано только в случае использования неэлектропроводящих каркасов катушек (в низкочастотных сейсмологических приборах это имеет место). Данное упрощение позволяет выявить некоторые качественные зависимости.

Прежде всего, обратим внимание на то, что в данном случае фазочастотная характери-

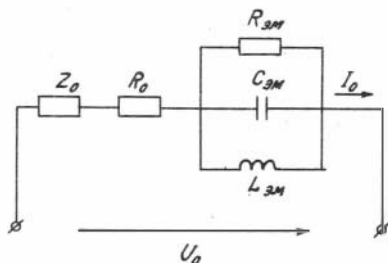


Рис.6.

ка сейсмоприемника дважды проходит через ноль. Указанный факт получил известность как свойство появления двух частот электромеханического резонанса  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Рассмотрим это.

Итак, чисто электрический импеданс сейсмоприемника, имеющий место при затормаживании его катушки, можно выразить

$$Z_3 = R_3 + j\omega L_3. \quad (I5)$$

Электромеханический импеданс, вызванный движением рабочей катушки, с учетом (I3) и (I4) может быть записан

$$\hat{Z}_{эм} = \frac{1}{\frac{1}{R_{эм}} + j\omega_{эм}}.$$

Учитывая, что на основании (I4)  $C_{эм} L_{эм} = I/\omega_0^2$  и вводя обозначения  $\delta\omega = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ , последнее выражение для малых значений  $\delta\omega \ll 1$  можно преобразовать:

$$\hat{Z}_{эм} \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0} \approx \frac{R_{эм}}{1 + 2j\omega_0 \delta\omega C_{эм} R_{эм}} \approx R_{эм} (1 - 2j\omega_0 \delta\omega C_{эм} R_{эм}). \quad (I6)$$

Первое условие электромеханического резонанса можно выразить как условие равенства нулю реактивной компоненты суммарного импеданса  $\hat{Z}_{эм} + \hat{Z}_3$ :

$$-2j\delta\omega C_{эм} R_{эм}^2 + j\omega_0(1 + \delta\omega_1)L_3 = 0,$$

откуда

$$\delta\omega_1 \approx L_3 / 2C_{эм} R_{эм}^2 = 2L_3 \beta^2 \omega_0^2 m / s_u^2. \quad (I7)$$

В выражении (I7) использована замена  $C_{эм}$  и  $R_{эм}$  на их значения из (I4).

Обратим внимание на следующее. Во-первых, частота  $\omega_1 = \omega_0 + \delta\omega_1$  не зависит от числа витков индуктивной катушки электродинамического преобразователя. Действительно, при изменении числа витков  $n$  имеет место пропорциональное изменение  $L_3$  и  $s_u^2$ , поскольку чувствительность  $s_u$  зависит от  $n$  линейно, а индуктивность  $L_3$  — квадратично, вследствие чего отношение этих величин в (I7) не меняется. Во-вторых, более высокочастотным сейсмоприемникам соответствует большая относительная величина  $\delta\omega_1$ , поскольку  $\omega_0$  входит в (I7) квадратично.

Для оценки второго электромеханического резонанса рассмотрим приближение  $\hat{Z}_{ЭМ}$  для значений  $\omega + \omega_2 \gg \omega_0$ . Это дает

$$\hat{Z}_{ЭМ} |_{\omega \gg \omega_0} \approx \frac{1}{j\omega_2 C_{ЭМ}}.$$

Условие  $\text{Im}(\hat{Z}_{ЭМ}(\omega_2) + \hat{Z}_{Э}(\omega_2)) = 0$  в данном случае означает

$$\omega_2 \approx \sqrt{1/L_Э C_{ЭМ}}. \quad (I8)$$

Подставляя в (I7) значение  $L_Э$  из (I8), а также заменяя  $L_{ЭМ}$  и  $R_{ЭМ}$  их выражениями из (II), получаем:

$$\delta\omega_1 = (\omega_1 - \omega_0)/\omega_0 \approx \frac{1}{2\omega_2^2 C_{ЭМ}^2 R_{ЭМ}^2} \approx 2\left(\beta \frac{\omega_0}{\omega_2}\right)^2 \approx 2\left(\beta \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2. \quad (I9)$$

Поскольку обычно  $\beta\omega_1 \ll 1$ , то приведенное выражение может быть использовано для уточнения значения  $\omega_0$  по данным измерения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

В некоторых работах, например /9/, делается попытка уточнить эквивалентную электрическую схему электродинамического сейсмоприемника для конструкции электропроводящих каркасов, когда эквивалентная схема электрического импеданса превращается в трансформатор. К сожалению, это привело к сложным соотношениям, неудобным для использования в широкой практике. Поэтому остается открытым вопрос о поиске решения, которое избавило бы экспериментатора от сложных путей измерения и обработки для получения конечного результата параметров  $\omega_0$ ,  $\beta$  и  $\varepsilon_{\text{д}}$  испытуемого сейсмоприемника.

Проведенный нами анализ показал следующее. Пренебречь трудноучитываемой реактивной компонентой импеданса  $\hat{Z}_{Э}$  не удастся. Так, например, для сейсмоприемников СВ-20 значения относительных величин частот первого и второго электромеханического резонансов оказываются соответственно равными  $\delta\omega_1 = 8\%$ ,  $\omega_2/\omega_1 \approx 10$ . Иными словами, влияние индуктивной компоненты электрического импеданса  $L_Э$  оказывается существенным во всем рабочем частотном диапазоне. Таким образом не удастся ни учесть импеданс  $\hat{Z}_{Э}$  (ввиду его сложности), ни пренебречь им (ввиду большой величины его).

Поиск возможных путей решения возникших трудностей показал, что выходом из положения может быть компенсация падения напряжения на электрическом импедансе  $Z_Э$  при протекании через него

возбуждающего тока  $I$ . Основанием к такому решению является тот факт, что хотя импеданс  $Z_{эм}$  не может быть отделен от импеданса  $Z_{э}$ , но зато импеданс  $Z_{э}$  может быть реализован отдельно от  $Z_{эм}$  путем затормаживания рабочей катушки сейсмоприемника. Это можно осуществить по-разному, например, пропуская через рабочую катушку сейсмоприемника постоянный ток такой силы, чтобы катушка оказалась прижатой к упорам.

Можно также воспользоваться вспомогательным сейсмоприемником, катушка которого затормаживается (заклинивается) механически. Основанием для такого решения является факт достаточно хорошей идентичности у промышленных партий сейсмоприемников. Так, например, для группы сейсмоприемников типа СВ-20 были определены следующие статистические характеристики:  $m(f_1) = 20,95$  Гц,  $\sigma(f_1) = 1,6$  Гц,  $m(f_2) = 190$  Гц,  $\sigma(f_2) = 15$  Гц;  $m(Z_1) = 530$  Ом,  $\sigma(Z_1) = 30$  Ом. Здесь  $f_1 = \omega_1/2\pi$  и  $f_2 = \omega_2/2\pi$  - это частоты первого и второго электромеханического резонанса, а  $Z_1$  - импеданс на частоте  $\omega_1$ ; символы  $m$  и  $\sigma$  означают среднюю величину и среднеквадратическое отклонение для соответствующих параметров.

Как видно, относительная величина отклонения частот первого и второго электромеханического резонанса оказывается меньше 10 %, а это значит, что использование без специального подбора какого-либо экземпляра сейсмоприемника в качестве эталона для уравнивания падения напряжения от возбуждающего тока на электрическом импедансе  $Z_{э}$  позволит осуществить компенсацию с погрешностью менее 10 %, что фактически означает уменьшение в 10 раз погрешностей измерения параметров испытуемого сейсмоприемника.

Отсюда следует вывод о том, что в  $\sqrt{10}$  раз расширяется верхняя граница того частотного диапазона, в котором может проводиться испытание с электрической стороны. В качестве первого приближения можно принять верхней границей испытаний - половину частоты второго электромеханического резонанса. В применении к этим условиям частотный диапазон испытаний для сейсмоприемника СВ-20 при наличии указанного метода компенсации составит 300 Гц, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к разведочной сейсмической аппаратуре. Аналогично ошибка в определении собственной частоты снизится до величины порядка одного процента, что также можно признать достаточным.

Измерение и расчетная оценка других параметров сейсмоприемника СВ-20 дали такие результаты:  $R_{\Sigma} = 270 \text{ Ом}$ ,  $2\beta = 0,8$ ,  $s_{\Sigma} = 18 \text{ В}\cdot\text{с/м}$ ,  $m = 0,018 \text{ кг}$ ,  $X_{C, \Sigma M} | f = 20 \text{ Гц} = X_{L, \Sigma M} | f = 20 \text{ Гц} = 280 \text{ Ом}$ , вследствие чего  $C_{\Sigma M} = 54 \text{ мкФ}$ ,  $L_{\Sigma M} = 2,2 \text{ Гн}$  и  $R_{\Sigma M} = 266 \text{ Ом}$ . На частоте второго электромеханического резонанса  $f_2 = 200 \text{ Гц}$  эквивалентная индуктивность сейсмоприемника (исходя из модели последовательного L-C контура) оказывается равной  $L_2 = 160 \text{ мГн}$ .

Рассмотрим пример реализации устройства для компенсации влияния падения напряжения на собственном электрическом импедансе сейсмоприемника. На рис.7 и 8 показаны варианты компенсации с использованием идентичного заторможенного сейсмоприемника. Здесь для целей компенсации используется сейсмоприемник, аналогичный испытываемому, рабочая катушка которого заторможена (заклинена). В низкочастотных сейсмоприемниках ( $f_0 < 10 \text{ Гц}$ ) затормаживание катушки может быть получено поворотом оси чувствительности относительно вертикали так, чтобы рабочая катушка легла на упоры; в сравнительно высокочастотных сейсмоприемниках ( $f_0 > 20 \text{ Гц}$ ) для затормаживания может потребоваться специальное приспособление.

Оценим погрешности, возникающие при определении параметров сейсмоприемников в методе испытания электрическим сигналом. Начнем с вопроса измерения собственной частоты. Итак, будем считать, что измерение осуществляется изменением частоты возбуждающего гармонического тока до тех пор, пока фаза напряжения на сейсмоприемнике не совпадет в пределах ошибки ноль-индикатора

$\Delta \varphi$  с фазой возбуждающего электрического тока. Ошибка  $\Delta \varphi$  неизбежно влечет ошибку частоты  $\Delta \omega = \omega_1 \cdot \delta \omega$ , которую и требуется определить. Фазовый сдвиг между током и напряжением в соответствии с эквивалентной схемой рис.6 можно выразить:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{Im} (\hat{Z}_{\Sigma}(\delta \omega) + \hat{Z}_{\Sigma M}(\delta \omega))}{\operatorname{Re} (\hat{Z}_{\Sigma}(\delta \omega) + \hat{Z}_{\Sigma M}(\delta \omega))} . \quad (20)$$

Здесь символы  $\operatorname{Im}$  и  $\operatorname{Re}$  означают соответственно мнимую и действительную части выражения. Подставляя в (20) значение действительных и реактивных компонент комплексных импедансов  $\hat{Z}_{\Sigma}$  и  $\hat{Z}_{\Sigma M}$  и пренебрегая членами второго порядка малости (в предположении  $\delta \omega \ll 1$ ), получаем

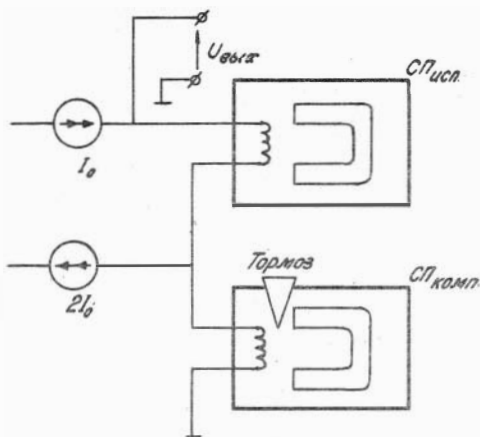


Рис. 7.

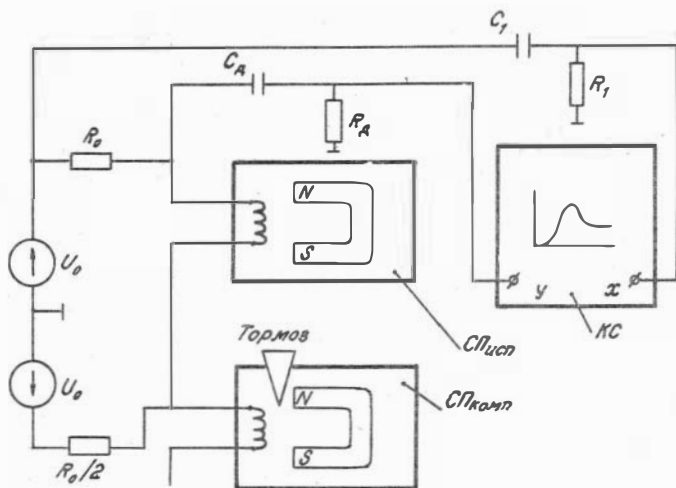


Рис. 8.

$$\operatorname{tg} \Delta \varphi = \frac{\omega_0 L_3 + \delta \omega (\omega_0 L_3 - \omega_0 R_{ЭМ}^2 C_{ЭМ})}{R_3 + R_{ЭМ}} \quad (21)$$

Поскольку речь идет об оценке погрешности, то можно в целях наглядности дополнительно пренебречь малыми членами, считая (с уче-



том компенсации)  $R_3 \ll R_{ЭМ}$  и  $\omega_0 L_3 \ll R_{ЭМ} \operatorname{tg} \varphi$ . Тогда выражение (21) принимает простой, наглядный вид:

$$\delta\omega \approx -\operatorname{tg} \Delta \varphi / \omega_1 R_{ЭМ} C_{ЭМ}.$$

Наконец, заменяя  $R_{ЭМ}$  и  $C_{ЭМ}$  их значениями из (14), получаем:

$$\delta\omega \approx -2\beta \operatorname{tg} \Delta \varphi. \quad (22)$$

Фазовая ошибка имеет порядок  $10^{-3} + 10^{-2}$  даже при использовании простейших средств измерения, например осциллографа. Поэтому при измерении оптимально успокоенных сейсмоприемников (при  $2\beta \rightarrow 1$ ) достижение погрешности в 0,1–1 % при измерении собственной частоты электродинамического сейсмоприемника не вызывает трудностей. Это в принципе позволяет использовать метод определения собственной частоты сейсмоприемника как средство контроля его исправности.

Погрешность измерения степени успокоения  $\sigma(\beta)$  можно выразить на основании (9) как функцию погрешностей определения фазы  $\sigma(\varphi)$  и погрешностей определения сдвига частот  $\sigma(\delta\omega)$ :

$$\sigma(\beta) = \sigma(\delta\omega) + \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{d \varphi} \sigma(\varphi) \approx \frac{\sigma(\varphi)}{\cos^2 \varphi}. \quad (23)$$

При использовании современных цифровых частотомеров относительная погрешность измерения частоты оказывается малой. Поэтому первым членом в выражении (23) можно пренебречь. В случае проведения экспериментов на сравнительно малых фазовых сдвигах, когда  $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$ , имеет место  $\sigma(\beta) = \sigma(\delta\omega) + \sigma(\varphi)$ . Это означает возможность сведения погрешности измерения практически к погрешности фазометра, которая может быть порядка 1–2 %, что лучше, чем при использовании каких-либо альтернативных методов.

Для определения погрешности чувствительности сейсмоприемника нужно воспользоваться выражением (12):

$$\sigma(S_u) = \frac{1}{2} (\sigma(U(\omega_0)/I(\omega_0)) + \sigma(m) + \sigma(\beta) + \sigma(\omega_0)). \quad (24)$$

Последними тремя слагаемыми можно пренебречь. Действительно,  $m, \beta$  и  $\omega_0$  могут быть определены с более высокой точностью, чем  $U(\omega_0)$  и  $I(\omega_0)$ , поскольку на точность определения падения напряжения на сейсмоприемнике  $U(\omega_0)$  влияет неидеальность компенсации напряжения на электрических импедансах  $R_3$  и  $L_3$ .

Будем считать, что компенсация осуществляется за счет ис-

пользования вспомогательного сейсмоприемника с заторможенной рабочей катушкой. В этом случае величина недокомпенсации фактически определяется неидентичностью и в относительном выражении равна ей. Выражая неидентичность как  $\delta(Z_1)/M(Z_1) = 30 \text{ Ом}/530 \text{ Ом} = 6\%$ , относительную погрешность измерения чувствительности можно выразить

$$\delta(s_u)/s_u = \frac{1}{2}(\delta(Z_1)/M(Z_1)) \approx 3\%,$$

что можно признать вполне удовлетворительным.

На основе измерения параметров  $\omega_0$  и  $\beta$  можно определить частотную характеристику электродинамического сейсмоприемника в диапазоне частот, превышающем его собственную частоту приблизительно в 10 раз: на более высоких частотах возможны отклонения из-за резонансов пружин, установочного резонанса корпуса и некоторых других причин. Поэтому актуальной является и задача полного контроля частотной характеристики, которую для электродинамического сейсмоприемника можно решить излагаемым ниже способом.

Покажем практически удобный путь определения частотных характеристик сейсмоприемников с электродинамическим преобразователем. Вначале следует напомнить, что электродинамический сейсмоприемник в своем обычном применении имеет в полосе частот выше резонанса сейсмической системы горизонтальную частотную характеристику в режиме постоянства колебательной скорости его корпуса. Выражение (8) показывает, что при возбуждении током постоянной амплитуды частотная характеристика при  $\omega \gg \omega_0$  соответствует режиму постоянных колебательных ускорений. Чтобы осуществить нужный режим постоянства колебательных скоростей, нужно выполнить дифференцирование выходного сигнала, что можно реализовать последовательным включением дифференцирующей цепи. Преобразование выражения (8) с учетом дифференцирования дает

$$\hat{U}/\hat{I} = \frac{K}{1 - (\omega_0/\omega)^2 - j2\beta\omega_0/\omega} = Kv_u. \quad (25)$$

Здесь  $v_u$  — частотная характеристика электродинамического сейсмоприемника в режиме постоянства колебательных скоростей, а  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Естественно, что измерение может быть осуществлено тем качественнее, чем точнее скомпенсирован собственный импеданс сей-

смоприемника. На рис.8 показана схема, позволяющая реализовать измерение частотной характеристики некоторого испытуемого электродинамического сейсмоприемника  $СП_{исп}$ . В схеме используется вспомогательный сейсмоприемник  $СП_{комп}$ , рабочая катушка которого заторможена. Испытуемый и компенсирующий сейсмоприемники включены последовательно в цепь возбуждающего электрического сигнала  $U_{вх}$ . Поскольку компенсирующий ток имеет вдвое большую величину, чем ток возбуждения, то падение напряжений на компенсационном сейсмоприемнике компенсирует падение напряжения от основного возбуждающего тока на обоих сейсмоприемниках.

Продифференцированное напряжение с выхода испытуемого сейсмоприемника (пропорциональное согласно (25) значению его частотной характеристики) подается на вертикальный вход координатного самописца КС, на горизонтальный вход которого подается напряжение, пропорциональное частоте возбуждающего тока. Последнее формируется дифференцирующей цепочкой  $R_1C_1$ . В результате при изменении частоты возбуждающего сигнала координатный самописец записывает частотную характеристику испытуемого сейсмоприемника. Таким путем можно определить

отклонение от горизонтали частотной характеристики исследуемых сейсмоприемников в рабочем диапазоне частот, причиной которых могут быть, например, высшие резонансы пружин.

В большинстве серийно выпускаемых сейсмоприемников для повышения успокоения и для взаимного выравнивания чувствительности используется резистивный шунт, обладающий некоторым сопротивлением  $R_{ш}$ . В этом случае его чувствительность уменьшается в  $\eta = R_{ш}/(R_{ш} + R_3)$  раз (индуктивным импедансом катушки пренебрегаем). В соответствии с этим в то же число раз уменьшается как ток, протекающий через рабочую катушку, так и наведенный при движении катушки электрический сигнал. Поэтому электромеханический импеданс, определяемый по-прежнему как отношение напряжений на клеммах сейсмоприемника к току, пропускаемому через него, оказывается равным

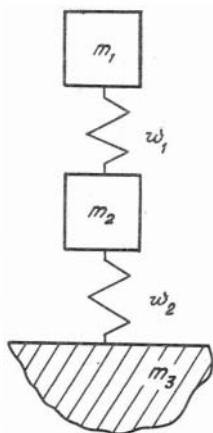


Рис. 9.

$$\hat{Z}_{ЭМ} = (\eta s_{\dot{u}})^2 / \hat{Z}_M \quad (26)$$

Обозначения в (26) те же, что и ранее. Как видно, для данного случая справедливы приведенные выше соотношения, если пользоваться понятием эффективной чувствительности  $s_{\dot{u}, \text{эф}} = \eta s_{\dot{u}}$ .

Теперь рассмотрим случай, когда движением корпуса сейсмоприемника пренебречь нельзя. Такая ситуация имеет место, если корпус сейсмоприемника жестко связан с грунтом (или платформой). Обратимся к конструктивной схеме, показанной на рис.9.

Здесь  $m_1$  - масса сейсмической системы,  $m_2$  - масса корпуса сейсмоприемника,  $m_3$  - масса подставки (фундамента),  $w_1$  и  $w_2$  - жесткости соответствующих пружинных связей. Будем считать, что движением массы  $m_3$  можно пренебречь, т.е. как это обычно имеет место,  $m_1 \ll m_2 \ll m_3$ , а в отношении частот механических резонансов

$$\omega_{01} = \sqrt{w_1/m_1} \ll \omega_{02} = \sqrt{w_2/m_2}.$$

В частотном диапазоне  $\omega_{01} \ll \omega \ll \omega_{02}$  колебательная скорость движения массы  $m_1$ , а значит, и деформация пружины  $w_1$  оказываются малыми, что следует из уравнения движения сейсмической системы /4/. Поэтому

$$\dot{u}_1 = \frac{F_I}{\hat{Z}_{1M}} = s_{\dot{u}} I / (2m_1 \omega_{01} \beta_1 (1 - \frac{j}{2\beta_1} (\frac{\omega_{01}}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_{01}}))) \approx - \frac{js_{\dot{u}} I}{m_1 \omega} \quad (27)$$

Здесь  $F_I$  - возбуждающая сила, а  $\hat{Z}_{1M}$  - механический импеданс резонатора, образуемого массой  $m_1$  и пружиной  $w_1$ .

При малой величине смещения  $u_1$  силы механических связей пружины  $w_1$  и демпфера  $h_1$  оказываются малыми и ими можно пренебречь. Поэтому на массу  $m_2$  будет действовать та же сила  $F_1$ , что и на массу  $m_1$ . Таким образом движение массы  $m_2$  может быть записано:

$$\dot{u}_2 = \frac{-F_I}{\hat{Z}_{2M}} = \frac{-s_{\dot{u}} I}{2m_2 \omega_{02} \beta_2 (1 + \frac{j}{2\beta_2} (\frac{\omega_{02}}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_{02}}))} \quad (28)$$

Знак минус вызван тем, что направление силы  $F_I$  по отношению к массам  $m_1$  и  $m_2$  взаимно противоположно. В диапазоне частот  $\omega \ll \omega_{02}$  справедливо приближение

$$\dot{u}_2 = \frac{-js_{\dot{u}} I \omega}{m_2 \omega_0^2} = \frac{-js_{\dot{u}} I \omega}{w}$$

Поскольку электрический сигнал сейсмоприемника определяется движением рабочей катушки по отношению к корпусу, то  $\dot{u} = \dot{u}_1 + \dot{u}_2$  или

$$U = s\dot{u} = js\dot{u} I \left( \frac{1}{m_1\omega} - \frac{\omega}{\omega_2^2} \right).$$

Как видно, движение корпуса  $u_2$  ослабляет сигнал  $U$ , причем этот эффект растет по мере приближения испытательной частоты  $\omega$  к частоте резонанса  $\omega_{02}$ . Естественно, что максимальным движением массы  $m_2$  будет на частоте резонанса  $\omega_{02}$ , когда  $\dot{u}_2 \approx s\dot{u} I / (2m_2\omega_{02}\beta)$ , вследствие чего

$$U \Big|_{\omega = \omega_{02}} \approx \frac{js\dot{u} I}{m_1\omega_{02}} \left( 1 + j \frac{m_1}{m_2 2\beta_2} \right). \quad (29)$$

Таким образом, максимальная величина поправки, обусловленная движением корпуса, из-за конечности его массы имеет квадратурную фазу по отношению к компоненте движения на более низких частотах и характеризуется относительной величиной  $m_1/2\beta_2 m_2$ , что говорит о принципиальной возможности определения частоты установочного резонанса методом воздействия на электрический вход электродинамического сейсмоприемника.

Выше речь шла главным образом об измерении абсолютных величин параметров, характеризующих сейсмоприемник. Однако в разведочной сейморазведке актуальна также и задача измерения относительных величин параметров, когда определяются отклонения параметров испытуемого образца от некоторого эталона. Метод косвенных испытаний — воздействием гармонического сигнала на электрический вход — дает возможность радикального решения этой задачи. Покажем это на примере схемы рис. 10. К парафазному источнику гармонического электрического сигнала  $U$  последовательно с равными добавочными сопротивлениями  $R_2$  и  $R_2^1$  подключены испытуемый и эталонный сейсмоприемники  $СП_{\text{исп}}$  и  $СП_{\text{эт}}$ . Последовательно с ними включены компенсационные импедансы  $Z_K$  и  $Z_K^1$ , равные средней величине (для испытуемой партии) собственного электрического импеданса сейсмоприемника  $Z_3$ . На компенсационные импедансы через сопротивления  $R_3$  и  $R_3^1$  подается от отрицательной фазы генератора ток удвоенной величины с целью компенсации падений напряжения на электрических импедансах испытуемого и эталонного сейсмоприемников, возникающих под действием зондирующего

тока. Компенсационные импедансы  $Z_K$  и  $Z'_K$  могут быть образованы заторможенными сейсмоприемниками, взятыми из испытуемой партии. При большом отношении  $|Z_{эм}| / |Z_э|$  можно вообще обойтись без использования компенсационных импедансов.

В качестве измерительных приборов используются фазочувствительный вольтметр ФЧВ – на основе синхронно управляемого ключа  $K$  и индикатора  $I_1$ , а также дифференциальный вольтметр – на основе конденсаторов  $C_2$  и  $C'_2$ , диодов  $D_1$  и  $D_2$ , индикатора  $I_2$ .

Сначала регулируется частота зондирующего сигнала  $U$  так, чтобы она совпала с частотой первого электро-механического

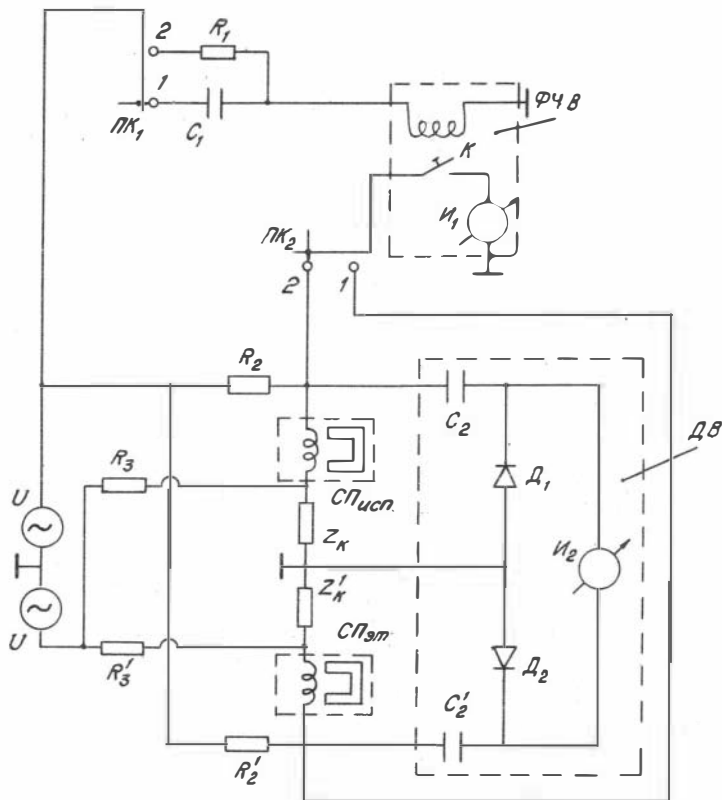


Рис. 10.

резонанса  $\omega_I$  эталонного сейсмоприемника  $СП_{ЭТ}$ . При этом разницей между этой частотой и собственной частотой эталонного сейсмоприемника можно либо пренебречь, либо впоследствии внести поправки в соответствии с соотношением (I7) или (I9). При установлении частоты  $\omega_1$  фазочувствительный вольтметр подключается к эталонному сейсмоприемнику (положение I переключателя  $ПК_2$ ) фаза тока управляющей катушки ключа К устанавливается квадратурно фазе тока, протекающего через сейсмоприемник  $СП_{ЭТ}$  (положение I переключателя  $ПК_1$ ). Это достигается благодаря емкостному характеру импеданса в цепи ключа и резистивному характеру импеданса в цепи сейсмоприемника. В результате показания индикатора  $I_I$  должно оказаться нулевым при совпадении фазы напряжения на сейсмоприемнике с фазой тока, т.е. при  $\omega = \omega_1$ .

Далее фаза тока, управляющего ключом К, изменяется на четверть периода, для чего емкость  $C_I$  в цепи управления ключом заменяется резистором  $R_1$  (переключатель  $ПК_1$  переводится в положение 2). После этого чувствительность индикатора  $I_I$  регулируется (регулятор чувствительности на схеме не показан) так, чтобы его показание стало равным

$$U_{u_1} = 1/\beta \quad (30)$$

Здесь  $\beta$  - степень успокоения эталонного сейсмоприемника, которая либо определяется экспериментально, либо берется из паспортных данных.

На следующем этапе измерения резистор  $R_1$  снова заменяется емкостью (переключатель  $ПК$  переводится в положение I), а фазочувствительный вольтметр переключается на испытуемый сейсмоприемник (положение 2 переключателя  $ПК_2$ ). В этом случае показание индикатора  $I_I$  с учетом (30) должно быть равно

$$U_{u_1}' = U_{u_1} \frac{Z_{ЭМ, ИСП}(\omega_1)}{Z_{ЭМ, ЭТ}(\omega_1)} \sin \varphi. \quad (31)$$

Здесь  $Z_{ЭМ, ИСП}(\omega_1)/Z_{ЭМ, ЭТ}(\omega_1)$  - отношение модульных величин импедансов испытуемого и эталонного сейсмоприемников на частоте  $\omega_1$ , а  $\varphi$  - фазовый сдвиг между напряжением на испытуемом сейсмоприемнике и протекающим через него током. Разброс между параметрами исправных сейсмоприемников внутри одной партии оказывается небольшим. Поэтому с учетом того, что выражение (31) опре-

деляет погрешность, а не параметр, в нем справедливо принять приближения  $\sin \varphi \approx \varphi$  и

$$Z_{эм,исп}(\omega_1)/Z_{эм,эт}(\omega_1) \approx 1.$$

Принимая также во внимание (9) и (30), выражение (31) для показания индикатора  $I_I$  можно представить  $U_{u1}' \approx \delta\omega$ , где  $\delta\omega$  — относительная разница между частотами первого электромеханического резонанса для испытуемого и эталонного сейсмоприемников.

Измерение относительной величины чувствительности испытуемого сейсмоприемника, учитывая соотношение (II), целесообразно провести на частоте  $\omega$ , значительно превышающей частоту резонанса сейсмической системы  $\omega_0$  (не менее, чем в 3-4 раза). В этом случае в выражении для механического импеданса сейсмической системы (7) можно принимать в расчет только параметр  $j\omega m$  (сила инерции существенно превышает силу жесткости пружины и "вязкости" демпфера). Поэтому показание индикатора дифференциального вольтметра  $I_2$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} U_2 = U_{исп} - U_{эт} &= I Z_{эм,исп} - I Z_{эм,эт} \approx \\ &\approx I \frac{s_{\dot{u},исп}^2}{m_{исп} \omega} - I \frac{s_{\dot{u},эт}^2}{m_{эт} \omega}. \end{aligned} \quad (32)$$

Здесь  $I$  — возбуждающий ток, протекающий последовательно через каждый из сейсмоприемников,  $s_{\dot{u},исп}$ ;  $m_{исп}$ ;  $s_{\dot{u},эт}$  и  $m_{эт}$  — параметры чувствительности и сейсмической массы для испытуемого и эталонного сейсмоприемников. Пренебрегая разницей в  $m_{исп}$  и  $m_{эт}$  (в предположении идентичности приборов внутри одной партии) и полагая  $s_{\dot{u},исп} = s_{\dot{u},эт}(1 + \delta_s)$ , где  $\delta_s$  — малая относительная разница в чувствительности ( $\delta_s \ll 1$ ), выражение (32) можно записать

$$U_2 = \frac{I s_{\dot{u},эт}^2}{m_{эт} \omega^2} (2\delta_s) = 2U_{эт} \delta_s. \quad (33)$$

Таким образом, индикатор  $I_2$  может быть проградуирован непосредственно в разнице чувствительности испытуемого сейсмоприемника относительно эталонного.

Третий параметр сейсмоприемника — степень успокоения — определяется вблизи частоты резонанса испытуемого сейсмоприемника с помощью фазочувствительного вольтметра. Для этого первоначально



но устанавливается частота  $\omega_1$  возбуждающего сигнала  $U$ , соответствующая нулевому фазовому сдвигу. Затем осуществляется сдвиг частоты на малую относительную величину  $\omega_1 \delta\omega$  ( $\delta\omega \ll 1$ ), по фазочувствительному индикатору  $I_I$  отсчитывается фазовый сдвиг, и в соответствии с (9) определяется степень успокоения как

$$\beta = \delta\omega / \varphi.$$

Следует, однако, заметить, что для определения исправности и идентичности электродинамических сейсмоприемников в массовых испытаниях, по-видимому, достаточно определять только два параметра – собственную частоту и чувствительность. В самом деле, степень успокоения, как и чувствительность, зависит от магнитного поля, связанного с индуктивной катушкой. Поэтому при совпадении чувствительностей для некоторой пары одной партии следует ожидать и близости степени успокоения.

Представляет интерес сравнение косвенных методов испытаний, использующих гармонический и импульсный сигналы возбуждения, тем более, что аппаратура импульсного возбуждения выпускается серийно /10/. В импульсном методе через индуктивную катушку электродинамического сейсмоприемника первоначально пропускается постоянный ток  $I$ . В результате на сейсмическую массу действует статическая возмущающая сила  $F_0 = s_{\dot{u}} I$ , под влиянием которой масса смещается от положения равновесия на величину

$$x_0 = F_0 / \omega^2 = \frac{s_{\dot{u}} I_0}{m \omega_0^2} \quad (34)$$

Здесь  $w$  – жесткость пружины, а  $\omega_0$  – собственная частота сейсмоприемника. После выключения тока происходит переходный процесс, который в случае, когда успокоение меньше критической величины ( $\beta < 1$ ), носит периодический характер. Скорость движения массы оказывается равной

$$\dot{x}(t) = \frac{\omega_0 x_0}{\sqrt{1-\beta^2}} e^{-\beta\omega_0 t} \sin \sqrt{1-\beta^2} \omega_0 t. \quad (35)$$

В устройстве, описанном в работе /10/, фиксируется время достижения максимума колебательной скорости  $\Delta t$ , амплитуда электрического сигнала, соответствующая этому максимуму  $U_1$  и отношение этой амплитуды к амплитуде следующего экстремума  $U_1/U_2$ . Эти величины дают возможность вычислить степень успокоения /10/.

$$\beta = \sin \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{\pi} \ln U_1 / U_2 \right),$$

собственную частоту

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} (1 - \beta^2)^{-1/2} \left[ \operatorname{arctg} (1 - \beta^2)^{-1/2} \beta^{-1} \right] \Delta t^{-1}$$

и относительную чувствительность

$$G = \left[ U_1 f_0 e^{(\arccos \beta)(\operatorname{tg} \arcsin \beta)} \right]^{1/2}.$$

Достоинством данного метода является отсутствие необходимости учитывать (или компенсировать) собственный электрический импеданс  $Z_0$ . Недостатками являются неудобство вычислений, относительная сложность аппаратуры (очевидно, что простыми средствами измерить экстремальные значения импульсного сигнала невозможно), а также меньшая точность измерения собственной частоты, а также факт измерения относительной, а не абсолютной чувствительности. Покажем возможность преодоления последнего недостатка.

В выражение (35) можно подставить значение  $x_0$  из (34), а также величины  $\beta$ ,  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$  и  $\Delta t$ , полученные из эксперимента.

С учетом этого можем записать

$$U_1(\Delta t) = \dot{u} \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \cdot \frac{\dot{u}_0 I_0}{m \omega_0^2} \cdot e^{-\beta \omega_0 \Delta t} \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 \Delta t,$$

откуда

$$\dot{u} = \sqrt{\frac{U_1(\Delta t)}{I_0} \frac{m \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{e^{-\beta \omega_0 \Delta t} \sin \sqrt{1 - \beta^2} \omega_0 \Delta t}}. \quad (36)$$

Сравнивая метод определения абсолютного значения чувствительности с применением импульсного и гармонического сигнала, нужно обратить внимание на удобство первого, заключающееся в отсутствии необходимости изыскивать пути учета падения напряжения на электрическом импедансе  $Z_0$ . Однако за это приходится расплачиваться трудностями определения экстремальных значений сигналов при переходных процессах, что обычно ведет к специфическим погрешностям. Поэтому в зависимости от конкретных условий "право на жизнь" могут иметь оба метода.

Косвенные методы испытания пьезоэлектрических сейсмоприемников. В основу анализа возьмем конструктивную схему,

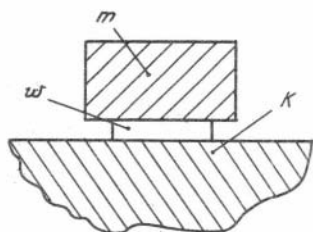


Рис. I1.

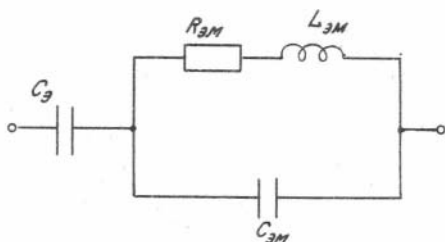


Рис. I2.

показанную на рис. I1. Пьезоэлемент  $w$ , являющийся одновременно упругостью сейсмической системы, жестко скреплен с корпусом  $K$  и инертной массой  $m$ . Для избежания излишних сложностей будем считать, что масса корпуса  $K$  столь велика, что в сравнении с ней инертной массой  $m$  можно пренебречь. Это может быть справедливо, если корпус жестко связан с массивным объектом. Будем также пренебрегать упругостью контактных соединений пьезоэлемента с массой  $m$  и корпусом  $K$ , полагая, что вся упругость  $w$  сосредоточена только в теле пьезоэлемента.

Воспользуемся выражением для комплексного входного электрического сопротивления пьезоэлектрического преобразователя  $|Z|$ :

$$\hat{Z}_{пп} = \frac{1}{p C_з} + \frac{s_u^2}{p w + w^2 / \hat{Z}_H} \quad (37)$$

Здесь  $C_з$  - электрическая емкость заторможенного пьезоэлемента;  $s_u = U/u |_{q=0}$  - чувствительность по смещению ненагруженного пьезоэлектрического преобразователя;  $\hat{Z}_H$  - механический импеданс внешней нагрузки;  $w = F/u |_{q=0}$  - жесткость холостого хода (при разомкнутой электрической цепи);  $p$  - оператор дифференцирования (для гармонического сигнала  $p = j \cdot \omega$ ). В качестве механической нагрузки  $Z_H$ , кроме массы  $m$ , необходимо учесть также демпфер  $h$ , который всегда проявляется в виде слабого вязкого трения. В результате

$$Z_H = h + pm$$

и следовательно,

$$\hat{Z}_{пп} = \hat{Z}_з + \hat{Z}_{эм} = \frac{1}{p C_з} + \frac{1}{p w / s_u^2 + \frac{w^2 / s_u^2}{h + pm}} \quad (38)$$

Выражению (38) соответствует показанная на рис.12 эквивалентная электрическая схема, для которой электромеханический импеданс  $\hat{Z}_{ЭМ}$  обращается в параллельный колебательный контур с параметрами

$$C_{ЭМ} = \frac{2\omega}{S_u^2} ; R_{ЭМ} = S_u^2 \frac{h}{\omega r^2} \quad \text{и} \quad L_{ЭМ} = S_u^2 \frac{m}{\omega r^2} . \quad (39)$$

Естественно, что при косвенном методе испытаний путем воздействия сигнала на электрический вход преобразователя наиболее рационально проводить эксперимент в условиях, когда отношение электромеханического  $Z_{ЭМ}$  и собственно электрического  $Z_{Э}$  импедансов является максимальным. Из рис.12 и выражения (38) непосредственно видно, что максимум  $Z_{ЭМ}$  имеет место вблизи частоты резонанса, когда  $\text{Im}(\hat{Z}_{ЭМ}) \rightarrow \infty$ . При этом  $\text{Im}(1/Z_{ЭМ}) \rightarrow 0$ . Последнее условие, заменяя  $p$  на  $j\omega$ , можно представить в виде:

$$\frac{1}{\hat{Z}_{ЭМ}} = j\omega C_{ЭМ} + \frac{1}{R + j\omega L_{ЭМ}} \rightarrow 0$$

ИЛИ

$$j\omega_0 C_{ЭМ} \approx \frac{j\omega_0 L_{ЭМ}}{R^2 + \omega_0^2 L_{ЭМ}^2} . \quad (40)$$

Пьезоэлектрические преобразователи всегда оказываются малоуспокоенными, что означает  $R \ll \omega_0 L_{ЭМ}$ . В этом случае из (40) следует

$$\omega_0 \approx 1 / \sqrt{L_{ЭМ} C_{ЭМ}} = \sqrt{\omega r / m} . \quad (41)$$

Таким образом, собственная частота пьезоэлектрического преобразователя может быть определена из условия резонанса. Последний проявляет себя по максимуму импеданса  $Z_{ЭМ}$  и по возникновению квадратурного фазового сдвига этого импеданса по отношению к собственно емкостному импедансу чисто электрической составляющей  $Z_{Э}$ .

Покажем возможность определения степени успокоения преобразователя по частотно-фазовой характеристике вблизи частоты резонанса  $\omega_0$ . Представим выражение (38) в виде:

$$\hat{Z}_{ПП} = \frac{1}{j\omega_0(1+\delta\omega)C_{Э}} + \frac{1}{j\omega_0(1+\delta\omega)C_{ЭМ} + \frac{1}{R_{ЭМ} + j\omega(1+\delta\omega)L_{ЭМ}} .$$

Вблизи частоты резонанса ( $\omega \rightarrow \omega_0$ ), пренебрегая малыми членами,

последнее выражение можно представить:

$$Z_{\text{пн}} \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0} \approx -\frac{j}{\omega_0 C_0} + \frac{j\delta\omega}{\omega_0 C_0} - j2\omega_0 L_{\text{ЭМ}} \delta\omega + \omega_0 L_{\text{ЭМ}} Q. \quad (42)$$

Здесь  $Q = R_{\text{ЭМ}}/\omega_0 L_{\text{ЭМ}} = 1/2\beta$  — добротность. Если удастся выполнить условие  $\delta\omega/\omega_0 C_0 \ll 2\omega_0 L_{\text{ЭМ}} \delta\omega$ , то

$$\text{Im}(\hat{Z}_{\text{пн}}(\delta\omega))/\text{Re}(\hat{Z}_{\text{пн}}(\delta\omega)) = \delta\omega/Q = 2\beta\delta\omega. \quad (43)$$

В выражении (43)  $\text{Im}(Z_{\text{пн}}(\delta\omega))$  — это приращение реактивной компоненты импеданса преобразователя при изменении частоты зондирования на относительную величину  $\delta\omega = (\omega - \omega_0)/\omega_0 \ll 1$ , а  $\text{Re}(\hat{Z}_{\text{пн}}(\delta\omega))$  — активная часть того же импеданса (приращением этой компоненты при малом изменении частоты  $\delta\omega$  можно пренебречь).

Таким образом, степень успокоения  $\beta$ , исчерпывающим образом определяющая затухание пьезоэлектрического преобразователя, может быть просто и удобно определена по выражению (43), если удастся выполнить условие (42). Для выполнения последнего условия нужно, чтобы при пропускании электрического тока через пьезоэлектрический преобразователь падение напряжения на собственном ёмкостном импедансе  $C_0$  было меньше напряжения на электромеханическом импедансе  $Z_{\text{ЭМ}}$ . Этого можно добиться, если скомпенсировать напряжение на емкости  $C_0$  путем подключения последовательно с преобразователем компенсационной емкости  $C_{\text{к}}$  и пропускания через нее тока противоположной полярности подобно тому, как это было сделано для электродинамического сейсмоприемника (см. рис. 7 и 8).

Теперь рассмотрим вопрос об определении чувствительности преобразователя  $s_u$ . Воспользуемся тем фактом, что вблизи частоты резонанса сравнительно легко можно определить величину электромеханического импеданса  $Z_{\text{ЭМ}}$ . Действительно, как уже было отмечено, при  $\omega \rightarrow \omega_0$  напряжение на  $Z_{\text{ЭМ}}$  максимально и квадратурно относительно компоненты тока. Поэтому, если последовательно с пьезоэлектрическим преобразователем включить емкостный импеданс, значительно превышающий импеданс самого преобразователя, то квадратурная компонента падения на преобразователе как раз и будет напряжением на электромеханическом импедансе

$$U_{\text{ПП}}/j\omega c \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0} = \hat{Z}_{\text{ЭМ}} \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0} = \frac{1}{(\omega_0 L_{\text{ЭМ}})^2 / R_{\text{ЭМ}}} = \frac{1}{\omega_0 L_{\text{ЭМ}} Q} \quad (44)$$

Подставляя в (44) значение  $L_{\text{ЭМ}}$  из (39), получаем:

$$\hat{Z}_{\text{ЭМ}} \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0} = \frac{\omega_0 S_u^2 m}{\omega^2 2\beta},$$

откуда

$$S_u = \sqrt{2\beta \omega_0^3 m Z_{\text{ЭМ}} \Big|_{\omega \rightarrow \omega_0}}.$$

Обсудим вопрос о реализации методов определения параметров пьезоэлектрического сейсмоприемника. Измерение собственной частоты является наименее сложной задачей. Действительно, при малом значении успокоения  $\beta$  (что практически всегда имеет место) изменение полного импеданса  $\hat{Z}_{\text{ПП}}$  вблизи резонанса оказывается значительным. Малость величины  $\beta$  означает также узость частотного интервала, на котором происходят эти изменения, что повышает точность определения экстремального значения частотной характеристики. При этом с равным успехом могут быть использованы самые различные пути и средства. Простейший из них – включение сейсмоприемника по схеме  $C_{\text{д}}$  – СП (рис.13) или  $R_{\text{д}}$  – СП (рис.14) делителя (здесь СП означает сейсмоприемник). При выборе добавочного импеданса  $C_{\text{д}}$  или  $R_{\text{д}}$  так, чтобы их величина превышала импеданс сейсмоприемника на частоте резонанса, возрастание до максимума падения напряжения на самом сейсмоприемнике  $U_{\text{СП}}$  является удобным критерием определения резонанса.

Процесс измерения может быть организован следующим образом. При использовании  $C_{\text{д}}$  – СП делителя целесообразно осуществлять плавное увеличение частоты испытательного сигнала, поданного на вход делителя. Тогда при приближении к частоте резонанса сначала должно наступать уменьшение сигнала  $U_{\text{СП}}$ . Действительно, из схемы рис.12 видно, что при  $\omega < \omega_0$  импеданс колебательного контура  $C_{\text{ЭМ}} - L_{\text{ЭМ}} - R_{\text{ЭМ}}$  имеет индуктивный характер. Таким образом, эквивалентная схема представляет собой индуктивное сопротивление контура, включенное последовательно с собственной емкостью  $C_{\text{э}}$  пьезоэлемента, вследствие чего суммарный реактивный импеданс уменьшается, поэтому в режиме постоянства испытательного тока напряжение на данном импедансе падает. Частота локально-

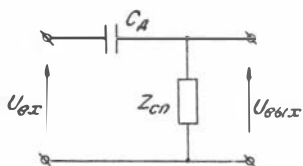


Рис. 13.

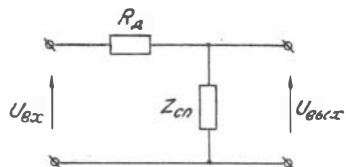


Рис. 14.

го минимума выходного сигнала может быть использована в качестве приближенной меры собственной частоты сейсмоприемника.

В непосредственной близости от резонанса, когда  $\delta\omega < \beta$ , уровень падения напряжения на  $Z_{ЭМ}$  становится максимальным, а фаза — квадратурной по отношению к фазе сигнала на  $C_Э$ . Этот факт дает возможность определить собственную частоту сейсмоприемника с высокой точностью. Наиболее рационально реализовать этот путь, осуществляя фазовые измерения. Так, в схеме  $C_Д$ -СП делителя в качестве критерия можно применить квадратурный детектор, например, синхронно работающий ключ (реле), управляемый током, протекающим в цепи  $C_Д$ -СП (рис. 15). Другой возможный вариант измерения — осциллографический — показан на рис. 16. Здесь критерием резонанса являются наступающие одновременно максимум сигнала на выходе делителя и максимум квадратурной составляющей этого сигнала, что наблюдается по увеличению малой оси эллипса на экране осциллографа.

При использовании схемы  $R_Д$ -СП делителя критерием резонанса может быть синфазность приложенного напряжения и напряжения на электромеханическом импедансе  $Z_{ЭМ}$ . Здесь, однако, возникает трудность из-за большой величины напряжения на емкости  $C_Э$ . Устранить эту трудность можно способом, показанным на рис. 17. Последовательно с сейсмоприемником включается емкость  $C_К$ , обладающая импедансом, равным собственному импедансу сейсмоприемника. Через эту емкость пропускается ток, противоположный по фазе току, протекающему через сейсмоприемник. Регулировкой этого тока (с помощью переменного резистора  $Z_{Д2}$ ) осуществляется компенсация напряжения на собственной емкости сейсмоприемника  $C_Э$ , индикатором чего является минимум сигнала на выходе делителя. Естественно, что компенсация должна осуществляться на частоте, далекой от резонанса. После осуществления компенсации определение собст-

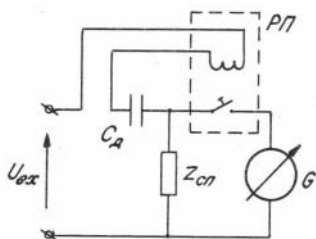


Рис.15.

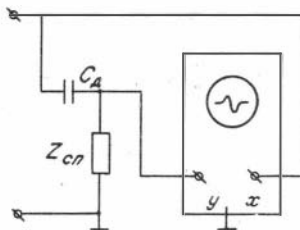


Рис.16.

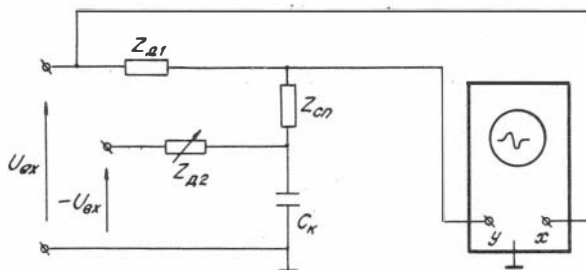


Рис.17.

венной частоты выполняется по критерию одновременного наступления максимума уровня сигнала на выходе делителя и его синфазности по отношению к питающему току.

Осуществление компенсации падения напряжения на собственной емкости пьезоэлемента  $C_{\text{э}}$  дает возможность определить степень успокоения. Действительно, измеряемый с помощью осциллографа фазовый сдвиг  $\varphi$ , возникающий при сдвиге частоты возбуждающего сигнала  $U_{\text{вх}}$  по отношению к частоте резонанса  $\omega_0$  на малую относительную величину  $\delta\omega$ , дает возможность определить отношение приращений реактивной и активной компонент импеданса  $\hat{Z}_{\text{эм}}$ :

$$\text{Im}(\hat{Z}_{\text{эм}}(\delta\omega))/\text{Re}(\hat{Z}_{\text{эм}}/\delta\omega) = \text{tg}\varphi. \quad (45)$$

Далее для определения степени успокоения можно воспользоваться соотношением (43).

Теперь рассмотрим пути определения чувствительности. Естественно, что это целесообразно делать вблизи частоты резонанса, когда падение напряжения на электрическом импедансе максимально.



При использовании схемы  $C_d$ -СП делителя в этом случае имеют место следующие отношения: при  $Z_d \ll Z_{эм}$  ток в цепи делителя равен  $\hat{I} \approx U_{вх} (j\omega C_d)$ . Квадратурная по отношению к этому току, а значит, и синфазная по отношению ко входному напряжению компонента выходного напряжения в этом случае может быть выражена

$$\hat{U}_{\text{вых}} = \hat{I} \hat{Z}_э = U_{\text{вх}} \frac{C_d \omega_0 s_u^2 m}{\omega^2 2\beta},$$

откуда

$$s_u = \sqrt{\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{2\beta\omega}{C_d}} = \omega_0 \sqrt{\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \cdot \frac{2\beta m}{C_d}}. \quad (46)$$

Таким образом, для определения чувствительности нужно знать либо жесткость пьезоэлемента  $w$ , либо массу сейсмической системы  $m$ , один из этих параметров удается обычно определить. Так, жесткость  $w$  может быть рассчитана по конфигурации пьезоэлемента с использованием справочных параметров для модуля Юнга. Очень часто используются пьезоприемники, у которых пьезоэлемент либо имеет призматическую форму, либо может быть этой формой аппроксимирован. В этом случае  $w = ES/\Delta$  (здесь  $S$  и  $\Delta$  - площадь осевого сечения и высота призмы, а  $E$  - модуль Юнга).

В варианте  $R_d$ -СП делителя в результате аналогичных выкладок получаем следующие отношения

$$s_u = \sqrt{\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \cdot 2\beta\omega_0 R\omega} = \sqrt{\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \cdot 2\beta\omega_0^3 m} \quad (47)$$

Если чувствительность сейсмоприемников выражается в вольтах, отнесенных к измеряемому ускорению, осуществляется простой пересчет  $s_u = s_u/\omega_0^2$ .

При определении чувствительности частота испытательного сигнала может быть смещена относительно частоты резонанса:

$$\omega = \omega_0(1 + \delta\omega).$$

В этом случае в соответствии с (42) в соотношениях (46) и (47) вместо степени успокоения  $\beta$  нужно подставлять  $\sqrt{\beta^2 + (\delta\omega)^2}$ . В частности, при  $\delta\omega \gg \beta$  параметр  $\beta$  заменяется на  $\delta\omega$ . Однако в этом последнем случае электрические напряжения на электромеханическом и собственном (емкостном) импедансах уже не квадратурны и, следовательно, не могут быть разделены по фазовому признаку. Поэтому, хотя этот путь и избавляет от нежелательной

необходимости определения степени успокоения  $\beta$ , но требует более тщательной компенсации напряжения на емкости  $C_3$ , что не легко осуществить.

Данный метод был практически использован для определения параметров некоторых типов пьезоэлектрических акселерометров. Опыт показал, что эксперимент может быть осуществлен на основе использования широко распространенных радиоизмерительных приборов. Так, в эксперименте были применены осциллограф СИ-49, звуковой генератор ГЗ-109 и цифровой частотомер ЧЗ-63. Эксперимент показал, что частота резонанса одинаково легко определяется как по схеме  $R_d$ -СП, так и по схеме  $C_d$  - СП делителя. При собственной емкости акселерометра в 750 пФ была последовательно включена добавочная емкость в 50 пФ. При этом резонанс вблизи частоты 48 кГц проявлялся сначала в уменьшении коэффициента передачи на 15 % (на частоте 47,0 кГц), а затем подъема - на 12 % (на частоте 47,9 кГц). Наблюдение фазового сдвига выполнялось по фигурам Лиссажу.

Определение степени успокоения удобнее было осуществить по схеме  $R_d$  - СП делителя. При этом фазовый сдвиг изменялся от значения  $\operatorname{tg} \varphi = -0,36$  на частоте 47109 Гц до  $\operatorname{tg} \varphi = +0,36$  на частоте 47333 Гц. Таким образом, тангенсу фазового сдвига в 0,36 соответствовало относительное изменение частоты

$$\delta\omega = (f_2 - f_1)/(f_2 + f_1) = 227 \text{ Гц} / 94445 \text{ Гц} = 2,38 \cdot 10^{-3},$$

чему соответствует

$$2\beta = 2\delta\omega / \operatorname{tg} \varphi = 1,32 \cdot 10^{-2}.$$

Измерение чувствительности оказалось удобнее выполнять по схеме  $C_d$  - СП делителя с компенсацией напряжения на собственной емкости сейсмоприемника: при использовании  $R_d$  - СП схемы делителя компенсацию было труднее осуществить. Кроме того, существенным неудобством измерения в  $R_d$  - СП схеме является неравномерность частотной характеристики - подъем сигнала на низких частотах. Результаты измерения показали, что напряжение недокомпенсации можно свести к величине  $\sim 2\%$ . При этом для емкости  $C_d = 50$  пФ при массе сейсмической системы  $m = 10$  г на частоте резонанса  $f_0 = 47,2$  кГц имеет место деление сигнала  $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = 1/24$ , что при подстановке в (46) с учетом  $s_{\ddot{u}} = s_u/\omega_0^2$  дает

$$s_{\dot{u}} = \frac{1}{6,28 \cdot 47,2 \cdot 10^3 \text{ Гц}} \sqrt{\frac{1}{24} 1,32 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{0,01 \text{ кг}}{50 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}}} \approx 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ В с}^2/\text{М},$$

что соответствует результатам измерений, полученным другими методами.

Рассмотрим еще вариант высокочастотного пьезоэлектрического преобразователя - с использованием согласованной механической нагрузки, обладающего свойством частотной широкополосности и потому весьма удобному для целей ультразвукового зондирования при сейсмическом моделировании /ИЗ/. На рис.18 показана конструкция в виде дискового пьезоэлемента 1, который одним торцом присоединен к волноводу 2, имеющему вид акустически согласованного стержня, а другим - к поверхности объекта 3. При акустических параметрах волновода  $\rho$  и  $C$  (где  $\rho$  - плотность, а  $C$  - скорость звука) механический импеданс волновода можно выразить /ИЗ/  $Z_M = \rho C S = R_M$ , где  $S$  - площадь поперечного сечения волновода. Таким образом, в данном случае импеданс является чисто активным.

Подставляя значение  $Z_M$  в выражение для электрического импеданса (37) получаем

$$Z_{\text{Э}} = \frac{1}{\rho C S} + \frac{S_{\dot{u}}^2}{\rho \omega M + \omega M^2 / R_M}. \quad (48)$$

Здесь  $s_{\dot{u}}$  и  $M_M$  - чувствительность и жесткость пьезоэлемента. Выражению (48) соответствует приведенная на рис.19 эквивалентная электрическая схема. Из (48) следует, что

$$C_{\text{ЭМ}} = \omega M / s_{\dot{u}}^2 \text{ и } R_{\text{ЭМ}} = s_{\dot{u}}^2 / \omega M^2.$$

Схемой (см. рис.19) можно воспользоваться для определения характеристик преобразователя при испытании с электрической стороны. Возможен такой путь испытаний. Последовательно с преобразователем включается известная емкость  $C_D$  малой величины ( $C_D \ll C_{\text{Э}}$ ). В этом случае при подключении преобразователя с такой добавкой к источнику напряжения  $U_{\text{ВХ}}$  ток в цепи оказывается равным

$$I = U_{\text{ВХ}} / \left( Z_{\text{Э}} + \frac{1}{j\omega C_D} \right) \approx U_{\text{ВХ}} (j\omega C_D),$$

а напряжение на преобразователе

$$U_{\text{ВЫХ}} = I \hat{Z}_{\text{Э}} = U_{\text{ВХ}} \left( \frac{C_D}{C_{\text{Э}}} - \frac{1}{\omega M / s_{\dot{u}}^2 C_D + \omega M^2 / j\omega R_M C_D s_{\dot{u}}^2} \right).$$

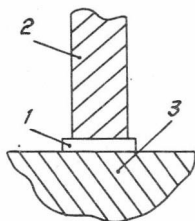


Рис. 18.

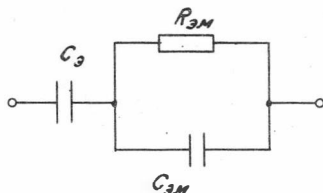


Рис. 19.

На низких частотах, когда

$\omega_M^2 / \omega R_M C_D S_u^2 \gg \omega_M^2 / S_u^2 C_D$  или  $\omega \ll \omega_M / R_M C_D = \omega_0$ , справедливо

$$\frac{U_{вх}}{U_{вх}} \Big|_{\omega \ll \omega_0} = \frac{C_D}{C_э}.$$

На высоких частотах, когда  $\omega \gg \omega_0$ , справедливо

$$\frac{U_{вх}}{U_{вх}} \Big|_{\omega \gg \omega_0} = \frac{C_D}{C_э} + \frac{C_D S_u^2}{\omega_M^2} = \frac{U_{вх}}{U_{вх}} \Big|_{\omega \ll \omega_0} + \frac{C_D S_u^2}{\omega_M^2}.$$

Откуда

$$S_u = \sqrt{\left( \frac{\omega_M}{C_D} \right) \left( \frac{U_{вх}}{U_{вх}} \Big|_{\omega \gg \omega_0} - \frac{U_{вх}}{U_{вх}} \Big|_{\omega \ll \omega_0} \right)}.$$

Таким образом, рассчитав жесткость пьезоэлемента  $\omega_M$ , используя справочные данные для пьезокерамики или измерив этот параметр механически, можно по данным измерения напряжения на нем как на емкостном делителе в области высоких и низких частот определить параметр чувствительности  $s_u$ .

Подводя общий итог, можно сказать следующее. Косвенные методы (основанные на испытании путем подачи сигнала на электрический вход) являются удобным средством определения основных параметров как электродинамических, так и пьезоэлектрических сейсмоприемников: собственной частоты, коэффициента демпфирования и чувствительности. Ввиду технической простоты и дешевизны, а также благодаря возможности проведения испытаний при расположении сейсмоприемника на объекте измерения данный метод может быть ши-

роко использован в технике полевых работ для повышения надежности результата измерения. Прямые методы испытаний наиболее рационально реализовывать в виде инерционной виброплатформы с использованием в качестве возбудителя обращаемого сейсмоприемника. Поскольку прямой путь испытания дает возможность определить полный объем характеристик, включая боковую и ротационную чувствительность, то он является необходимым средством при испытании новых и модернизируемых образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иориш Ю.И. Виброметрия. М.: Машгиз, 1963. 563 с.
2. Ризниченко Ю.В. Инерционная вибрационная платформа // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1939. № 3. С.268-274.
3. Пасечник И.П. Вибрационная платформа для исследования разведочных сейсмографов // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. 1950. Т.ХIV, № 6. С.514-529.
4. Гик Л.Д. Измерение вибраций. Новосибирск: Наука, 1972. 292 с.
5. Гик Л.Д., Карандеев К.Б. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1962. 130 с.
6. Гамбурцев Г.А. Основы сейсморазведки. М.: Госстройтехиздат, 1959. 378 с.
7. Слущковский А.И. Сейсморазведочная аппаратура. М.: Недра, 1970. 343 с.
8. Бжассо А.Д., Чернов В.В. Погрешности устройств технологического контроля основных параметров электродинамических сейсмоприемников // Геофизическая аппаратура. № 85. Л., 1986. С.39-43.
9. Шведчиков Л.К. Определение параметров электродинамического сейсмоприемника методом обращения // Прикладная геофизика. М., 1981. Вып.101. С.62-79.
10. А.с. № II22993, СССР/ Комлык В.Л., Пак В.А., Чернов В.В. Способ проверки индукционных сейсмоприемников. Опубл. 07.II.84. Бюл. № 41.
11. Ермолов И.Н., Гитис М.Б., Королев М.Б. и др. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И.И.Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
12. Харкевич А.А. Теория преобразователей: Избр. тр. Т.1. М., 1973. С.52-218.
13. Программно-аппаратурный комплекс "Эхо-1" для ультразвукового сейсмического моделирования / Б.А.Бобров, Л.Д.Гик, Н.М.Держи, Ю.А.Орлов. Новосибирск: Изд. ИГиГ, 1984. 124 с.

Утверждено к печати  
Институтом геологии и геофизики СО АН СССР

---

Технический редактор Н.Н. Александрова

---

Подписано к печати 19.09.90.

Бумага 60x84/16. Печ.л.2,75. Уч.-изд.л.2,6.

Тираж 200. Заказ 323. Бесплатно.

---

Институт геологии и геофизики СО АН СССР  
Новосибирск, 90. Ротапринт.