

Применение обращенных электродинамических сейсмоприемников в качестве вибраторов

Гик Л.Д., институт геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Соображения технологичности, простоты изготовления и транспортабельности в отдельных случаях делают целесообразным создание сейсмических вибраторов на принципе "обращения" электродинамических сейсмоприемников, т.е. включения последних в режиме генерации механических колебаний. Единичный сейсмоприемник, обладающий массой около 0,1 кг, способен генерировать силы с амплитудой порядка одного кН. Группирование нескольких сейсмоприемников позволяет увеличить генерируемую силу пропорционально числу группированных элементов, а применение узкой резонансно настроенной связи с зондируемым объектом позволяет дополнительно увеличить силу пропорционально добротности резонатора. Оба эти фактора дают резерв увеличения силы в десятки и даже сотни раз. Добавление накопления сигнала на стадии приема позволяет достигнуть дальности зондирования в десятки километров.

Вибратор на основе единичного сейсмоприемника. Для проведения некоторых сейсмических экспериментов в качестве возбудителей зондирующих сигналов требуются силовые источники сравнительно небольшой мощности. Такая задача может быть решена путем "обращения" серийных электродинамических сейсмоприемников. Под обращением понимается включение сейсмоприемника генератором, т.е. приложением к его рабочей катушке электрического тока, в результате чего он превращается в источник механической силы.

Подобным путем реализуются важнейшие качества серийных электродинамических приемников - высокая чувствительность $s = Bl = U_{\text{из}}/u' = F/I$, высокая стабильность и небольшая масса. Здесь B - магнитная индукция, l - суммарная длина провода в зазоре магнитной системы, $U_{\text{из}}$ - выходной электрический сигнал, u' - колебательная скорость, F - генерируемая сила и I - электрический ток. Чувствительность большинства серийных сейсмоприемников имеет величину $s_0 \sim 30$ Вс/м.

Существуют две причины, ограничивающие величину генерируемой силы. Это, во-первых, допустимая мощность, рассеиваемая на катушке ($P_{\text{кат}}$), и, во-вторых, допустимое перемещение этой катушки в зазоре магнитной системы ($\Delta_{\text{кат}}$). Допустимая электрическая мощность зависит от поверхности катушки и условий отвода тепла. В реальных условиях эту мощность приходится ограничивать величиной не более $P_{\text{кат}} < 5-10$ Вт, что означает ограничение тока величиной $I_{\text{кат}} < \sqrt{(P_{\text{кат}}/R_{\text{кат}})} \sim 0,22-0,33$ А. (Здесь $R_{\text{кат}}$ - электрическое сопротивление катушки, составляющее приблизительно $R_{\text{кат}} \sim 100$ Ом). Поэтому максимальная величина возбуждаемой силы может быть не более $F_{\text{кат}} \sim 6-10$ Н (0,6-1 кг).

Вторая ограничивающая причина - длина зазора магнитной системы определяется конструкцией сейсмоприемника и составляет обычно $\Delta_{\text{кат, макс}} = 1-3$ мм. Это заставляет ограничивать и величину генерируемой силы. Действительно, колебательное смещение катушки u , вызванное приложенной к ней силой $F = s_0 I$, определяется соотношением [1]

$$u = F / (w + i h \omega + (\omega^2 m)) \quad (1)$$

Здесь $w + i h \omega + (\omega^2 m)$ - динамическая жесткость колебательной системы, w - механическая жесткость пружины, h - коэффициент демпфирования, m - масса, ω - круговая частота $\omega = \sqrt{-1}$. Подставляя в (1) неравенство $u < \Delta_{\text{кат}}$, после простых преобразований получаем:

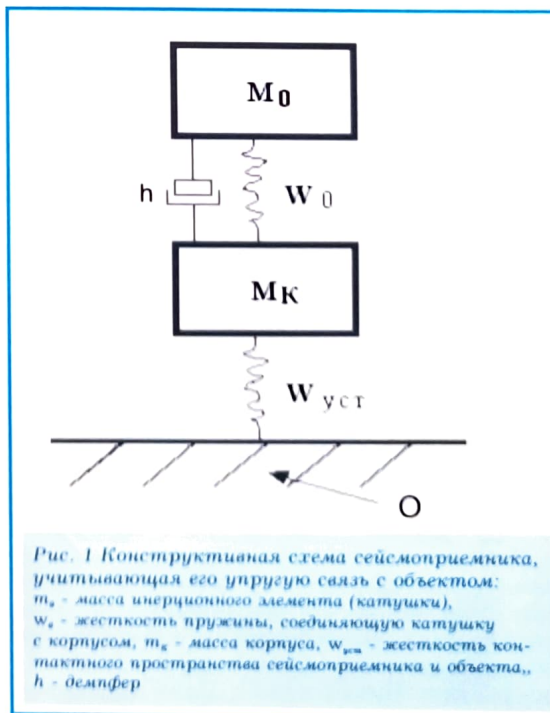
$$F_{\text{кат}} < m \Delta_{\text{кат}} \omega_{\text{рез}}^2 / (1 - (\omega / \omega_{\text{рез}})^2 - i Q (\omega / \omega_{\text{рез}})) \quad (2)$$

Здесь $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{w/m}$ - частота резонанса, а $Q = h^{-1} \sqrt{w_0/m_0}$ - добротность резонатора, образуемого пружиной w и массой m .

Корпус сейсмоприемника превращается в источник силы, приложенной к удерживающей его платформе, начиная от частоты резонанса $f_{\text{рез}} = \omega_{\text{рез}}/2\pi$ и выше. В этой области частот допустимая величина генерируемой силы оказывается функцией частоты:

$$F_{\text{кат}} \leq m_{\text{кат}} \Delta_{\text{кат}} \omega^2 \quad (3)$$

Поэтому у сейсморазведочных приемников при реализации максимально возможной силы $F_{\text{кат}} = 10$ Н и при массе инерционного элемента $m_{\text{кат}} = 0,02$ кг частота генерируемого сигнала должна быть не менее величины $f > f_{\text{мин}} = (1/2\pi) \sqrt{(F_{\text{кат}}/m_{\text{кат}} \Delta_{\text{кат}})} = 65$ Гц, у сейсмологических (при массе инерционного элемента $m_{\text{кат}} \sim 1$ кг) не менее $f > f_{\text{мин}} = 9,1$ Гц. Если возникает необходимость возбуждать колебания с частотой меньше величины $f_{\text{мин}}$, то приходится ограничивать величину возбуждающего тока $I < I_{\text{кат}}$ для того, чтобы избежать ограничения движения катушки в пределах зазора, расплачиваясь за это уменьшением генерируемой силы.





ИННОВАЦИИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

$$F[f < f_{\min}] = F_{\max} \cdot (f/f_{\min})^2.$$

Частотный диапазон генерируемых колебаний имеет равномерную характеристику в пределах начиная от собственной частоты сейсмоприемника, что фактически следует из (1), и кончая частотой установочного резонанса его связи с объектом. Покажем это. Обратимся к эквивалентной конструктивной схеме сейсмоприемника рис. 1, установленного на геофизическом объекте (роль которого чаще всего выполняет поверхность почвы). Здесь m_0 и w_0 - масса катушки и пружина, соединяющая ее с корпусом, m_k и $w_{\text{св}}$ - полная масса сейсмоприемника и распределенная упругость почвы. Рассмотрение рисунка показывает, что к поверхности объекта помимо электромагнитной силы F_1 фактически оказываются приложенными еще сила растяжения пружины $F_w = wu$ и сила вязкого сопротивления демпфера $F_b = -hu'$. Здесь u и u' соответственно колебательное смещение и колебательная скорость движения катушки.

На частотах меньших собственной частоты сейсмоприемника $f \leq f_{\text{рес}} = (1/2\pi)\sqrt{w_0/m_0}$ движением корпуса (на эквивалентной схеме - движением массы m_k) можно пренебречь (по сравнению с движением катушки u). Поэтому сила F_k , приложенная к корпусу, а значит и к поверхности геофизического объекта, оказывается равной: $F_k = F_1 - F_w - F_b$. После простых преобразований получаем:

$$F_k = F_1(f/f_{\text{рес}})^2 / (1 - (f/f_{\text{рес}})^2 + iQ^{-1}(f/f_{\text{рес}})) \quad (4)$$

Из (4) видно, что при $Q \gg 1$ (что практически всегда имеет место у электродинамических сейсмоприемников) частотная характеристика "сейсмоприемника-вибратора" фактически имеет две области - равномерную $F_k/F_1 \approx 1$ при $f \geq f_{\text{рес}}$ и квадратично падающую $F_k/F_1 \approx (f/f_{\text{рес}})^2$ при $f \leq f_{\text{рес}}$. Таким образом, сейсмоприемник, используемый в качестве вибратора, необходимо выбирать так, чтобы его собственная частота $f_{\text{рес}}$ была ниже требуемого частотного диапазона генерируемых колебаний - от 10 до 30 Гц для сейморазведочных и на один - два порядка ниже для сейсмологических сейсмоприемников.

В области верхних частот ограничение частотного диапазона наступает вследствие резонанса, образуемого массой сейсмоприемника m_k в паре с упругостью приконтактной области поверхности геофизического объекта $w_{\text{св}}$. Здесь можно ввести термин "частоты установочного резонанса" $f_{\text{св}} = (1/2\pi)\sqrt{w_{\text{св}}/m_k}$. Расчет этой частоты связан с трудностями определения распределенной упругости $w_{\text{св}}$. Для объекта, представляющего собой однородную геоакустическую среду в [3] создан приближенный метод расчета этой величины $w_{\text{св}} = 8\gamma(1-\gamma^2)(V_s)^2\rho g$. Здесь $\gamma = V_s/V_p$ - отношение скоростей поперечной и продольной волн, ρ - плотность среды, а g - радиус поверхности контакта сейсмоприемника с почвой. Данный метод приводит к приближенному соотношению $f_{\text{св}} \sim 2,52 V_s$. В частности, для зоны малых скоростей (при $V_s \sim 50$ м/с) получаем: $f_{\text{св}} \sim 126$ Гц.

Частота установочного резонанса применительно к низкоскоростным почвам верхней части сейсмического разреза характеризуется величиной порядка первых сотен Гц, а применительно к высокоскоростным скальным горным породам - порядка нескольких тысяч Гц. Нами опробованы

некоторые пути повышения частоты установочного резонанса. Это - увеличение поверхности контакта вибратора с почвой, повышение жесткости поверхности почвы путем пропитки ее клеевыми составами, а также некоторые другие. Использование этих мер применительно к рыхлым низкоскоростным средам позволяет поднять частоту установочного резонанса в 1,5-3 раза.

Пути увеличения генерируемой силы. Обсудим возможные пути увеличения генерируемой силы. Первый очевидный путь - это группирование, т.е. жесткое механическое соединение некоторого количества (N) индивидуальных сейсмоприемников. Легко убедиться, что на частотах ниже частоты установочного резонанса $f < f_{\text{св}}$ генерируемая сила в этом случае возрастает в N раз: $F_N = N \cdot F_1$. Естественно, что данный путь приводит к пропорциональному увеличению, как массы вибратора, так и мощности питающего электрического генератора. Кроме того, увеличение массы вибратора приводит к снижению частоты установочного резонанса $f_{\text{св},N} = f_{\text{св},1}/\sqrt{N}$. По-видимому, разумное число сейсмоприемников в группе может составить величину $N=20-300$. Данным путем принципиально возможно построить вибратор, обладающий способностью генерировать силу величиной в несколько десятков килограмм. Увеличение мощности электрического генератора не влечет возникновения проблем. Серийные звуковые генераторы обычно имеют мощность порядка 5-10 Вт. Можно также применить различные усилители мощности, серийно выпускаемые промышленностью (в том числе и для бытовых электроакустических целей), обладающие выходной мощностью до 100 Вт и даже более. Возможен также легко реализуемый путь построения генераторов высокой мощности на принципе коммутаторов батарей постоянного тока с помощью бесконтактных ключей, например тиристорных. Прямоугольная форма выходного сигнала, образующаяся в этом случае, не мешает достижению конечного результата. Этот путь позволяет при минимальных затратах создать силовые возбудители значительной мощности.

Рассмотрим второй метод увеличения генерируемой силы вибратора - путем резонансного его соединения с зондируемым

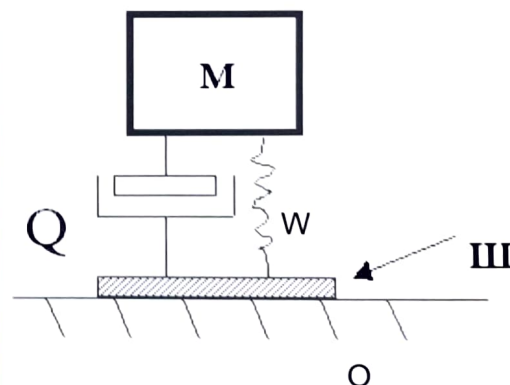


Рис. 2 Резонансная связь сейсмоприемника с объектом:

m - масса сейсмоприемника,
 w - пружина упругой связи сейсмоприемника с объектом,
 Q - демпфер, Ш - жесткий штамп, O - объект

объектом. Физической основой резонансного увеличения силы является последовательное (во времени) накопление энергии гармонических колебаний с каждым последующим циклом ("накачка"). Обратимся к рис. 2. Здесь показан обращенный сейсмоприемник М, штамп "П", жестко связанный с поверхностью объекта, пружина w , упруго соединяющая сейсмоприемник со штампом, и поршень Q, учитывающий демпфирующее действие элементов конструкции. При возбуждении гармонической силы $F = s_w \cdot I \sin(\omega t)$ масса сейсмоприемника m приходит в движение с колебательным смещением, определяемым выражением (1). На частоте резонанса $\omega = \omega_{m,3} = \sqrt{w/m}$ выражение колебательного смещения приобретает вид:

$$|u| = F/(h\omega) = (F/w) \cdot (\sqrt{w/m})/h = |u_{m,30}| \cdot Q \quad (5)$$

Здесь $|u_{m,30}|$ - колебательное смещение, возбуждаемое вибратором в дорезонансной полосе частот. Для механических резонаторов величина добротности обычно составляет несколько десятков ($Q \rightarrow 50$). Именно во столько раз произойдет усиление колебаний, генерируемых резонансным вибратором. Из этого следует, что группирование в сочетании с резонансным усилением колебаний позволяет создать вибратор, способный возбудить силу величиной в сотни килограмм.

Чтобы получить возможность возбудить импульсный сигнал, используемый в большинстве сейсморазведочных методов, необходимо осуществить вариацию частоты излучаемого сигнала в диапазоне от f_1 до $f_2 = f_1 + \Delta f$. Здесь $\Delta f = 1/\tau$, а τ - требуемая длительность зондирующего импульса. Для реализации такой задачи следует осуществить вариацию параметров резонатора - жесткости пружины w или массы m .

Как показал опыт нашей работы, обе эти задачи разрешимы, хотя реализация их требует некоторых аппаратных усложнений. Простым способом уменьшения жесткости пружины в узком диапазоне - порядка 10-20 % является ее нагрев. Для реализации более широкого диапазона потребовалось изменение длины пружины (или изменения количества витков винтовой пружины). Опыт показал, что оба эти пути технически разрешимы, хотя и требуют конструктивного усложнения аппаратуры.

Вариация вибрирующей массы m технически решалась нами следующим образом. С корпусом сейсмоприемника жестко соединялся наполненный жидкостью сифон. Вариация массы выполнялась вытеканием жидкости из сифона.

Некоторые применения. Использование перечисленных выше путей позволяет применять обращенные сейсмоприемники не только в задачах генерации слабых сигналов, но и в тех областях геоакустики, в которых обычно применяются вибраторы средней и даже большой мощности. Укажем два из таких применений: нагрузочные испытания геоакустических сред и зондирование протяженных геофизических объектов. В первом случае требуется возбуждение колебательных смещений, обладающих значительными динамическими напряжениями. Из изложенного выше следует, что в обычном режиме серийный сейсмоприемник, работающий в обращенном режиме, способен возбуждать

механическое напряжение $\sigma = F/S$, где S - поверхность его соприкосновения с объектом. Последнюю можно выполнить в виде концентратора небольшой площади $S \sim 0,1 \text{ см}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ и даже менее. Поэтому при величине возбуждающей силы $F \sim 1 \text{ кГ}$ напряжение может превысить величину $\sigma = 1 \cdot 10^7 \text{ т/м}^2$, что примерно соответствует нагрузке, создаваемой вибратором средней мощности. Потенциальная возможность увеличения этого напряжения резонансным путем показывает практическую применимость такого метода, в особенности при проведении экспериментов в условиях лаборатории.

Чтобы оценить возможности работы обращенных сейсмоприемников в установках, предназначенных для зондирования геофизических объектов, воспользуемся соотношением, связывающим амплитуду колебательного смещения u и силу F , удаленную на расстояние L от точки приема [2]:

$$u_i = F/(4\pi\rho V^2 L) \quad (6)$$

Поглощением пока будем пренебрегать. В соответствии с (6) ограничением дальности приема сейсмического сигнала $L_{\max}$ является ослабление амплитуды волны u_i до уровня микросейсмического шума $u_{\text{сш}}$, т.е. $L(u_i \geq u_{\text{сш}})$. В сейсморазведке характеристики микросейсмического шума часто выражают величиной электрического сигнала $U_{\text{сш,э}}$, возбуждаемого этим шумом в электродинамическом сейсмоприемнике. Такой сигнал пропорционален колебательной скорости микросейсмического шума $u'_{\text{сш}}$ и согласно данным практики при стандартной чувствительности электродинамического сейсмоприемника $s_p \sim 30 \text{ В/см/с}$ по порядку величины составляет $U_{\text{сш,э}} = 2\pi u'_{\text{сш}} s_p \sim 2 \cdot 10^7 \text{ В}$. Поэтому предельная дальность зондирования $L_{\max}$ применительно к излучению гармонического сигнала может быть выражена условием $U_a(L) = 2\pi f u(L) s_p > U_{\text{сш,э}}$. С учетом приведенных выше соотношений это составляет:

$$L_{\max} < (F/s_p)/(2\rho V^2 U_{\text{сш,э}}) \quad (7)$$

Сделаем конкретные оценки применительно к задаче зондирования верхней части разреза ($\rho \sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $V_p = 300 \text{ м/с}$) единичным обращенным сейсмоприемником ($F_i = 10 \text{ Н}$) на частоте $f = 100 \text{ Гц}$. Подставляя в (7) значения указанных параметров, получаем $L_{\max}[f = 100 \text{ Гц}, V = 300 \text{ м/с}, \rho \sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3] \sim 300 \text{ м}$.

Необходимо учитывать, что при наличии поглощения, которое для плоской волны можно выразить экспоненциальным соотношением $u_i(L)/u_i(0) = \exp(-\pi L/Q\lambda)$, величина зондирующего сигнала по сравнению с (6) падает. Соответственно уменьшается и допустимая величина базы зондирования $L_{\max}$. Так, на удалениях $L > L_0 = \lambda Q/\pi$ зондирующий сигнал начинает падать очень резко. Поэтому при наличии поглощения реальное удаление ограничивается величиной L_0 . В данном случае при длине волны $\lambda = V/f = 3 \text{ м}$ и при низкой величине добротности геоакустической среды $Q_{\text{сш}} \sim 20$, соответствующей зоне малых скоростей это составляет $L_{\max}$. При решении инженерно-геологических задач такая дальность зондирования, по-видимому, может оказаться достаточной; в противном случае придется снижать длину волны зондирующего сигнала.

Однако и при зондировании протяженных



ИННОВАЦИИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



ИННОВАЦИИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

геолого-геофизических объектов применение обращенных сейсмоприемников в качестве источников также дает принципиальную возможность реализовать сейсмическое зондирование. Точные оценки максимально достижимых удалений L_{max} в этом случае связаны с некоторыми трудностями, т.к. форма траектории распространения зондирующего сигнала (в лучевом приближении) в соответствии с принципом "наименьшего времени" оказывается сложной. В соответствии с этим простоты оказываются и функции, связывающие зависимость глубины проникновения луча H , сейсмические скорости V и добротности зондируемой геологической среды Q с временем распространения волны t . Необходимые приближенные оценки можно выполнить, опираясь на эмпирические соотношения, известные по работам специалистов глубинного сейсмического зондирования: $H_{max} \sim L_{max}/10$, $Q_H [H > 2-3 \text{ км}] = (100-200) \sim 150$ и $V_H [H > 10 \text{ км}] \sim 10 \text{ км/с}$ ($\lambda_H [f \sim 5 \text{ Гц}] \sim 2 \text{ км}$). Учет этих соотношений показывает, что применение единичного сейсмоприемника на частоте $f \sim 5 \text{ Гц}$ в случае пренебрежения потерями на поглощение и потерями энергии волны в градиентной среде (идеального акустического согласования низкоскоростных слоев верхней части разреза с высокоскоростными погруженными слоями) допускает очень малую дальность зондирования $L_{max} \sim 0,5 \text{ м}$. Однако применение группирования порядка $N=20$ излучателей, использование резонансного эффекта при добротности порядка $Q_{res} \sim 30$, а также осуществление накопления принимаемого сигнала в течении времени $T_{нак} \sim 1$ часа в общей сложности позволяет увеличить эту дальность до величины $L_{max} = L_{max1} N Q_{res} \sqrt{(T_{нак}/T_1)} \sim 400 \text{ км}$. Что же касается дальности зондирования, ограничиваемой поглощением, то в этом случае ее величина составляет $L_0 = \lambda_p Q \sim 300 \text{ км}$. Две последние цифры как раз и показывают, что достижение дальности зондирования в несколько сотен километров при построении источников на принципе обращенных сейсмоприемников можно считать реальным.

Экспериментальные исследования. Эксперименты включали в себя следующие работы:

1. Изучение свойств серийных сейсмоприемников.
2. Определение достижимых силовых параметров этих сейсмоприемников в обращенном режиме.
3. Изучение возможностей увеличения силового воздействия за счет группирования и резонансного соединения вибраторов с почвой.
4. Исследование частотных характеристик "сейсмоприемников-вибраторов" и анализ путей их расширения.
5. Осуществление профильного зондирования в условиях рыхлых почв верхней части разреза.

Для оценки достижимых силовых возможностей сейсмоприемников необходимо выполнить измерение, по крайней мере, следующих их характеристик: чувствительности (электро-механического коэффициента) s_e , собственной (резонансной) частоты f_{res} и степени успокоения (или обратной ей величины - добротности Q) и частоты установочного резонанса $f_{уст}$. Анализ возможных путей решения этих задач показал преимущество косвенного метода, основанного на

электрическом, а не на механическом испытании [5]. Для экспериментов были отобраны несколько типов вертикальных сейсморазведочных приборов марки СВ, имеющих конструкцию в виде магнитной системы, жестко связанной со стальным корпусом, и рабочей катушки, соединяемой с магнитной системой посредством двух дисковых пружин. Механический контакт такого прибора с геофизическим объектом осуществляется коническим штырем, привинчиваемым к корпусу. Масса опробованных нами приборов находилась в пределах $M_k = 150-200 \text{ г}$, масса катушки имела величину порядка $m_{кат} = 20 \text{ г}$. При измерении чувствительности корпус жестко укреплялся (привинчивался) к массивному основанию. Испытательное возбуждение осуществлялось путем пропускания через рабочую катушку гармонического тока $I = I_0 \sin(\omega t)$, амплитуда которого I_0 . На горизонтальном участке частотной характеристики при $f_{res} < f < f_{уст}$ катушка приходит в движение с ускорением $u'' = F/m_{кат} = s_e I/m_0$ (колебательной скоростью $u' = s_e I/\omega m_{кат}$). Электрический сигнал, возбуждаемый при данном движении, становится равным $U_s = s_e u' = (s_e)^2 I/\omega m_{кат}$. Отсюда может быть определена чувствительность: $s_e = \sqrt{(U_s \omega m_{кат}/I)}$. Как видно, измерение чувствительности сейсмоприемника удается выполнить чисто статическим экспериментом - без использования вибростенда. При этом требуется измерение только одного механического параметра - массы катушки $m_{кат}$; остальные параметры - возбуждающий ток I , электрическое напряжение на катушке U , и частота ω измеряются электрически. При исследовании конкретной группы из 20 сейсмоприемников типа СВ-20 средняя чувствительность оказалась равной $s_e = 30 \text{ Вc/м}$ при разбросе $\sigma(s_e)/s_e < 5\%$.

Измерение собственной частоты $f_{res} = \omega_{res}/2\pi = (1/2\pi)\sqrt{w_0/m_{кат}}$ и добротности Q также выполнялось статическим способом - по переходу через ноль фазового сдвига между током I и напряжением на катушке U : $\varphi(U, I) = \arctg(1 - (\omega/\omega_{res})^2 / (Q^2 - (\omega/\omega_{res})^2))$. При $\varphi(U, I) = 0$ имеет место $\omega = \omega_{res}$ [5]. Нулевая величина фазового сдвига определялась осциллографическим методом - по "схлопыванию" эллипса на фигурах Лиссажу. Таким путем достигается высокая точность измерения, поскольку погрешность не превышает величины $d(\omega_{res})/\omega_{res} < 1\%$.

Изучение эффекта увеличения генерируемой силы, достигаемого резонансным соединением сейсмоприемника с геофизическим объектом, проводилось в двух типах сред: низкоскоростной рыхлой песчано-глинистой почве, типичной для зоны малых скоростей ($V_p \sim 300 \text{ м/с}$), и консолидированной среднескоростной среде ($V_p = 2700 \text{ м/с}$), близкой по своим параметрам к горным породам средних глубин. Конструкция излучающего вибратора выполнялась в виде упругого соединения двух стандартных идентичных электродинамических сейсмоприемников. При этом пружина, соединяющая сейсмоприемники, была выполнена в виде изогнутой П-образной пластины. Ее жесткость w_1 путем подбора толщины и конфигурации выполнена так, чтобы механический резонатор, образуемый ею и массой сейсмоприемника, имел частоту порядка $f_{res,1} \sim 45 \text{ Гц}$, что обеспечивало достаточное удале-

ние как от собственной частоты сейсμοприемника $f_{\text{pec}} \sim 20$ Гц, так и от частоты установочного резонанса $f_{\text{уст.pec}} \sim 150$ Гц.

Нижний сейсμοприемник этой конструкции обычным путем (с помощью навинчиваемого штыря) укреплялся на исследуемом геофизическом объекте. Поэтому его частотная характеристика оказывается горизонтальной, начиная от нуля и кончая частотой установочного резонанса $f_{\text{уст.pec}}$.

Что же касается верхнего сейсμοприемника данной конструкции, то упругое соединение его с нижним образует механический резонатор, обладающий свойствами фильтра нижних частот второго порядка [1], характеризующегося острым резонансным пиком на частоте $f_{\text{pec.1}} = \sqrt{w_1/M_{\text{сн}}}$ как в режиме приема, так и генерации колебаний. Для приема возбуждаемых колебаний в эксперименте использовался третий сейсμοприемник идентичный первым двум. Эффект резонансного усиления излучаемых колебаний в консолидированную среду оказался близким к величине ее добротности $Q \sim 30-35$. Эксперимент в рыхлой среде показал существенно меньшие величины, как добротности Q , так и соответствующего ей увеличения амплитуды генерируемых колебаний $\sim 2.5-3$. Объяснение столь значительного падения добротности резонатора в рыхлой среде, по-видимому, следует искать в большей величине поглощения.

Интересным, но в то же время и трудно объяснимым фактом является различие величин добротностей резонатора в режимах приема и излучения колебаний. Даже в консолидированной среде при изменении режима от излучения к приему добротность резонатора возрастает приблизительно в полтора раза - от $Q=30-35$ до $Q=50$. Возможно, это происходит из-за большого различия кривизны фронта волн, имеющих место при излучении и приеме.

Было также проведено зондирование линейного профиля в зоне малых скоростей. Такой объект типичен для задач инженерной сейсмологии. Геоакустическая среда здесь характеризуется значительной неоднородностью, что обусловлено чередованием утрамбованных и рыхлых участков поверхности, присутствием остатков строительного мусора и других неоднородностей. Зондирование выполнялось следующим образом. Прием сигнала выполнялся обычным электродинамическим сейсμοприем-

ником, жестко укрепленным на поверхности почвы. В качестве источников зондирующего сигнала попеременно использовались сейсμοприемник, напрямую соединенный с почвой, и сейсμοприемник, резонансно соединенный с почвой посредством упругой пружины, образующей в паре с корпусом резонатор, обладающий собственной частотой около 48 Гц. В первом случае частота зондирующего сигнала выбиралась равной частоте установочного резонанса, оказавшейся при данном типе почвы равной $f_{\text{уст.pec}} = 130$ Гц. Во втором случае зондирование выполнялось на собственной частоте резонатора $f_{\text{pec}} = 48$ Гц.

При проведении эксперимента использовались стандартные электронные измерительные приборы. Для возбуждения источников был применен звуковой генератор с частотным диапазоном от 20 Гц до 200 кГц, имевший величину выходной мощности 5 Вт. Измерение принимаемого сигнала выполнялось серийно выпускаемыми электронными приборами: двухлучевым осциллографом, цифровыми вольтметром и частотомером.

Фрагмент измерений волнового поля профиля приведен на рис. 3. Как видно, в условиях рыхлой низкоскоростной геоакустической среды дальность действия зондирующего сигнала, ограничивается микросейсмическими шумами и оказывается не менее величины $L_{\text{max}} \sim 10$ м.

Выводы:

1) На основе обращенных (включенных генератором силы) серийных электродинамических сейсμοприемников могут быть построены удобные для сейсмического зондирования вибраторы. При этом единичный сейсμοприемник способен развить силу величины порядка десяти ньютонов (1 килограмма).

2) Применение упругой резонансно настроенной связи "сейсμοприемника - вибратора" с объектом позволяет увеличить генерируемую силу в число раз, равное добротности - несколько десятков. Жесткая связь группы сейсμοприемников увеличивает генерируемую силу в число раз, равное количеству элементов в группе. Таким образом, величину генерируемой силы можно увеличить на несколько порядков.

3) Частотный диапазон таких вибраторов имеет равномерную характеристику, начиная от собственной частоты сейсμοприемника (10 - 30 Гц для сейсморазведочных и на один - два порядка ниже - для сейсмологических) и кончая частотой установочного резонанса его связи с объектом (100-200 Гц в рыхлых почвах и более тысячи Гц - в консолидированных).

Литература

1. Гик Л.Д. Измерение вибраций. Наука, Новосибирск, 1972, 292 с.
2. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. Авторы: Н.Н. Пузырев, А.В. Тригубов, Л.Ю. Бродов и др. Недра, М. 1985, 280 с.
3. Программно-аппаратурный комплекс "Эхо-1" для ультразвукового сейсмического моделирования. Методические рекомендации. Сост. Б.А. Бобров, Л.Д. Гик, Н.М. Держи и Ю.А. Орлов. Изд. Института Геологии и Геофизики СО АН СССР, 124 с.
4. С.В. Гольдин. Интерпретация данных сейсмического метода отраженных волн. М., Недра, 1979, 344 с.
5. Гик Л.Д. Контроль параметров сейсμοприемников без нарушения их механической связи с исследуемым объектом. Автометрия, 2000, №2, с. 91-103.

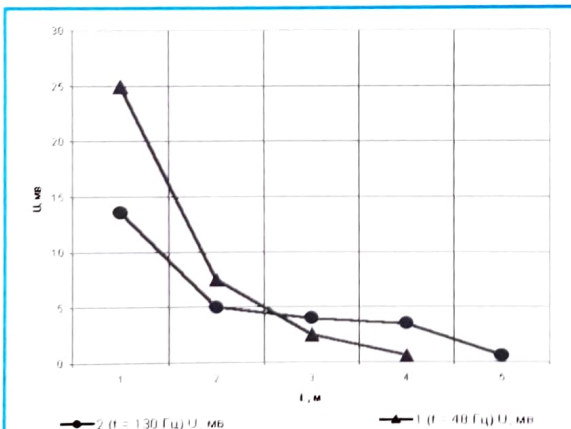


Рис. 3 Зондирование профиля в верхней части разреза:
1 - резонансно соединенным вибратором ($f=48$ Гц),
2 - жестко соединенным вибратором ($f=130$ Гц)

ИННОВАЦИИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ