

Электродинамические сейсмоприёмники в российской геофизике

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

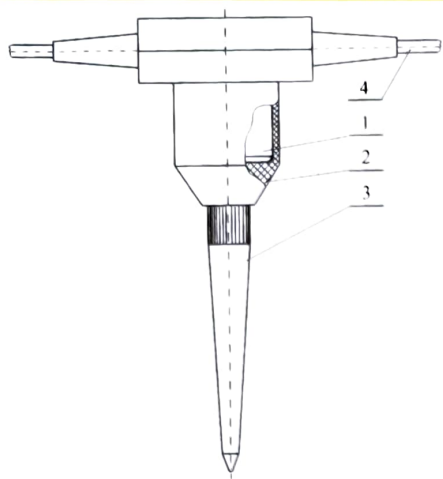


Рисунок 1. Общий вид сейсмоприёмника (пояснения в тексте).

Сейсмоприёмник является основным звеном сейсморегистрирующей системы и в первую очередь от его технических характеристик зависит качество, достоверность и разрешающая способность сейсмической записи. В настоящее время сейсморазведочные работы в основном проводят с использованием электродинамических сейсмоприёмников. Электродинамический принцип преобразования механических колебаний изучаемой среды в электрические сигналы впервые применил в сейсмическом приборостроении Б.Б. Голицын, создав в 1902 году сейсмомер с гальванометрической записью. Применяемый в наземной сейсморазведке современный электродинамический сейсмоприёмник, изображённый на рисунке 1, представляет собой электромеханическую систему, состоящую из преобразователя сейсмоприёмника 1 и корпуса 2 со штырём 3 для соединения с исследуемой средой и выводами 4 для соединения с внешней электрической цепью. Такие свойства электродинамических сейсмоприёмников, как: высокая надёжность в работе, отсутствие источников питания, возможность группирования, достаточная фазовая идентичность, большой динамический диапазон, низкий уровень шумов, небольшие нелинейные искажения, удовлетворительные значения выходных сопротивлений, небольшие массы, большой диапазон рабочих температур - обеспечили их широкое применение на протяжении многих десятилетий.

Электродинамические сейсмоприёмники стали применяться в сейсморазведке со времени её появления в начале двадцатых годов прошлого века. С тех пор они, вслед за улучшением технических характеристик постоянных магнитов, прошли большой путь совершенствования своей конструкции - от прибора с масляным затуханием и массой 15 кг до преобразователя сейсмоприёмника с электромагнитным затуханием и массой менее 0,09 кг. К началу шестидесятых годов усилиями американской фирмы Geo Space преобразователь сейсмоприёмника приобрёл защищённую от внешних электромагнитных полей дифференциальную магнитную систему с двумя воздушными зазорами и постоянным магнитом из сплава Алюминий-8. В результате, технические характери-

стики сейсмоприёмника стали удовлетворять наибольшему количеству требований сейсморазведки. Тот факт, что разработанный в то время сейсмоприёмник GS-20DX серийно выпускается и по сей день, свидетельствует о совершенстве его конструкции, технологичности изготовления и достаточно высоком уровне технических характеристик. За это время в США, Канаде, Франции, Китае и в России их изготовлено много десятков миллионов.

Действовавшая в Советском Союзе система по созданию сейсмоприёмников отличалась от американской. Так научные исследования большинства электродинамических сейсмоприёмников и разработка их конструкторской документации выполнялись во ВНИИГеофизике Министерства геологии, а разработка технологической документации, освоение производства и серийное изготовление - на уфимском заводе геофизического приборостроения Министерства приборостроения. Эта система работала довольно успешно и полностью обеспечивала постоянно растущую потребность сейсморазведочных предприятий в сейсмоприёмниках для всех видов сейсморазведочных работ. Например, в последний (1991) год существования СССР уфимским заводом было изготовлено 424300 сейсмоприёмников СВ-20П, СВ-10Ц, СВ1-20ТС. После поражения Советского Союза в холодной войне система была разрушена и, как результат, была утрачена независимость развития отечественного геофизического приборостроения. Производство электродинамических сейсмоприёмников в России теперь принадлежит фирме Geo Space и она заинтересована в выпуске своих GS-20DX, GS-30CT, GS-32CT, а не сейсмоприёмников, разработанных в России.

Преобразователь электродинамического сейсмоприёмника. Главные свойства сейсмоприёмника определяют параметры двух основных звеньев: механического колебательного звена и преобразователя. В электродинамическом сейсмоприёмнике эти звенья объединены в один конструктивно законченный узел - преобразователь сейсмоприёмника. Устройство преобразователя сейсмоприёмника, разработанного во ВНИИГеофизике, показано на рисунке 2.

Магнитная система преобразователя содержит постоянный магнит 1, два полюсных наконечника 2 и 3, магнитопровод 4. Крышки 5 и 6 обеспечивают соосное расположение полюсных наконечников 2 и 3 с магнитопроводом 4.

Механическое колебательное звено преобразователя состоит из инерционного тела - катушки, подвешенной на двух одинаковых пружинах 7 и 8, опирающихся на магнитную систему. В катушку входят каркасы 9 и 10 с обмотками 11 и 12 и соединяющая каркасы гильза 13, выполненная из непроводящего материала. Начала обмоток спаяны между собой, а каждый конец обмотки 11 и 12 припаян к своему каркасу 9 или 10. Электрический контакт каркаса 9 (или 10) с пружиной 7 (или 8) осуществляется через их механическое соединение. Две одинаковые пружины 14 сжимают внутреннее кольцо каждой пружины 7 и 8, обеспечивая надёжный подвижный электрический контакт. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре показано на графике 15.

При относительном перемещении магнитной системы и катушки витки обмоток и каркасов пересекают магнитное поле. В обмотках наводит-

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ: НОВЕЙШИЕ
РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ
МОИ УНИВЕРСИТЕТЫ



Рисунок 2. Преобразователь сейсмоприёмника (пояснения в тексте).

ся ЭДС пропорциональна скорости относительного перемещения. В короткозамкнутых каркасах возникают вихревые токи, препятствующие относительному перемещению катушки и магнитной системы и обеспечивающие затухание свободных колебаний. Обмотки, движущиеся в магнитном поле, являются электродинамическими преобразователями. Обмотки имеют равное количество витков, намотаны встречно и соединены последовательно. ЭДС, возникающие в обмотках при колебаниях сейсмоприёмника, суммируются, а помехи, наводимые внешними переменными электромагнитными полями, вычитаются.

Конструктивные параметры преобразователя имеют обозначения: Δ – длина воздушного зазора; a_1 – зазор между внутренней поверхностью каркаса катушки и поверхностью полюсного наконечника; a_2 – зазор между наружной поверхностью катушки и внутренней поверхностью магнитопровода; D и L – диаметр и длина постоянного магнита; L_r и L_0 – высота и длина обмотки; L_{Π} – длина полюсного наконечника; L_T – толщина стенки полюсного наконечника; B_M – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Сейсмоприёмники, изготавливаемые в России до 1992 года, были разработаны на основе методики графоаналитического расчёта [16]. Данная методика требует большого количества экспериментальных исследований, связанных с подбором оптимальной нагрузки выбранного постоянного магнита. При этом оптимальной является нагрузка, при которой длина воздушного зазора магнитной системы позволяет получить максимальное произведение средней магнитной индукции в воздушном зазоре на корень квадратный из используемого объёма воздушного зазора при наименьшем его размере. Такой критерий оценки длины воздушного зазора не учитывает влияние на выбор оптимальных размеров воздушного зазора магнитной системы заданной степени затухания преобразователя сейсмоприёмника и отклонений значений магнитных параметров постоянных магнитов.

В отечественной литературе известен аналитический способ расчёта и проектирования магнитных систем с постоянными магнитами для магнитоэлектрических приборов [2], позволяющий получать заданное значение магнитной индукции в воздушном зазоре. Но получение расчётной индукции в воздушном зазоре не позволя-

ет вычислить оптимальные геометрические размеры сейсмоприёмника и его наибольший коэффициент преобразования для заданных параметров сейсмоприёмника и постоянного магнита.

Во ВНИИГеофизике разработан новый способ расчёта конструктивных параметров электродинамического преобразователя [8], позволяющий получить в магнитной системе его преобразователя воздушный зазор с оптимальными размерами, обеспечивающими наибольший коэффициент преобразования для заданных исходных параметров (частота свободных колебаний, степень затухания, сопротивление обмотки) и выбранных параметров постоянного магнита (диаметр, длина и материал сплава). Уравнение для расчёта длины воздушного зазора имеет вид:

$$\Delta = \sqrt[3]{\frac{a}{f_0 \beta_2 \rho_2 \delta} \cdot H^2 L^2 \cdot \frac{\mu_0 q}{16\pi} + \frac{a}{3}}, \quad (1)$$

где Δ – длина воздушного зазора; $a = (a_1 + a_2)/2$; a_1 и a_2 – определены в пояснениях к рисунку 2; f_0 – частота свободных колебаний, β_2 – степень затухания, создаваемого каркасом катушки; H – напряженность магнитного поля в точке, соответствующей максимуму удельной магнитной энергии, отдаваемой магнитом в воздушные зазоры; L – длина постоянного магнита; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; q – коэффициент усреднения квадрата магнитной индукции.

Длина воздушного зазора Δ , рассчитанная по формуле (1), будет оптимальной и обеспечивающей максимально возможный коэффициент преобразования сейсмоприёмника для заданной длины постоянного магнита и выбранной напряженности его магнитного поля, а также при таких заданных параметрах, как: частота свободных колебаний f_0 , степень затухания β_2 , сопротивление обмотки катушки R_1 сейсмоприёмника), выбранный размер зазора a . Зазор a отражает уровень технологии изготовления деталей и качества сборки сейсмоприёмника.

Теория электродинамического сейсмоприёмника. Анализ развития теории сейсмоприёмников изложен в [5]. Современная теория электродинамического сейсмоприёмника с двумя воздушными зазорами в магнитной системе дана в [7]. В соответствии с ней передаточная функция сейсмоприёмника является произведением передаточных функций: преобразователя, механического колебательного звена, высокочастотного формирующего апериодического звена, созданного индуктивными связями, и выражается формулой:

$$W(p) = \frac{U_{\text{вых}}}{\dot{x}_k} = \left(\pm K_{\Pi} \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{R_1 + R_{\text{ш}}} \right) \cdot \frac{\tau_0^2 p^2}{\tau_0^2 p^2 + 2\beta\tau_0 p + 1} \cdot \frac{2\tau_2 p + 1}{(\tau_1 + \tau_2) p + 1}, \quad (2)$$

где $U_{\text{вых}}$ – сигнал на выходе сейсмоприёмника, $\dot{x}_k$ – скорость перемещения корпуса, K_{Π} – коэффициент преобразования электродинамического преобразователя, $R_{\text{ш}}$ – сопротивление шунта, R_1 – сопротивление обмотки, $\tau_0 = 1/\omega_0$ – постоянная времени механического колебательного звена, β – степень затухания; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – круговая частота свободных колебаний, f_0 – частота свободных колебаний, $\tau_1 = L_1/(R + R_{\text{ш}})$ – постоянная времени обмотки, L_1 – индуктивность

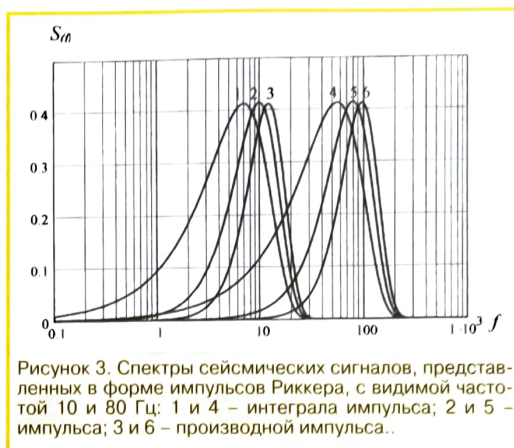
обмотки, $\tau_2 = L_2 / R_2$ – постоянная времени каркаса катушки, L_2 и R_{III} – индуктивность и сопротивление каркаса.

Передаточная функция преобразователя сейсмоприёмника заключена в скобки и представляет собой произведение коэффициента преобразования и делителя, состоящего из сопротивлений обмотки и шунта. Передаточная функция неинвертирующего преобразователя будет иметь положительный знак, а инвертирующего – отрицательный знак.

Разрешающая способность сейсмоприёмника зависит от согласованности его АЧХ со спектром сейсмического сигнала, его динамического диапазона и спектральной плотности шума.

Согласованность АЧХ сейсмоприёмника со спектром сейсмического сигнала. В наземной сейсморазведке видимая частота колебаний сейсмического сигнала зависит от свойств исследуемой геологической среды и находится в пределах от 10 до 80 Гц [3, 4, 17]. На рисунке 3 показаны спектры сейсмических сигналов, представленных в форме импульса Риккера, его интеграла и производной с частотами 10 и 80 Гц. Амплитуда спектра на каждой частоте имеет максимальное значение на видимой частоте и убывает как с понижением, так и с повышением частоты. Для приёма сейсмических сигналов без искажений в указанных пределах видимых частот, АЧХ сейсмоприёмника должна иметь вид полосового фильтра с частотным диапазоном от 10 до 80 Гц и с крутизной фронтов, совпадающей с крутизной фронтов спектров крайних частот. И от того, чему пропорционально выходное напряжение сейсмоприёмника – смещению сейсмической волны, скорости смещения или ускорению смещения – зависит требуемая ширина частотного диапазона АЧХ согласованного фильтра. Для смещения сейсмической волны частотный диапазон АЧХ этого фильтра сдвинут в низкие частоты, для скорости смещения – в высокие, а для ускорения смещения – расположен посередине. В [17] установлено, что уменьшение частотного диапазона фильтра сверх необходимого как со стороны низких, так и со стороны высоких частот, а также увеличение крутизны фронтов фильтра, приводит к искажению сигнала и увеличению его длительности. Расширение же частотного диапазона сверх необходимого увеличивает уровень шума.

У электродинамического сейсмоприёмника выходной сигнал пропорционален скорости смещения сейсмической волны и он дифференцирует (усиливает пропорционально увеличению частоты) смещение сейсмической волны, а ускорение сейсмической волны – интегрирует (ослабляет обратно пропорционально увеличению частоты). В [17] недостаточная разрешающая способность сейсморазведки связывается с ослаблением высокочастотных составляющих в сейсмических колебаниях, воспринимаемых электродинамическими сейсмоприёмниками. На уменьшение доли высоких частот влияют такие причины, как: ограничения, связанные с генерированием этих частот взрывными и невзрывными источниками; группирование источников и сейсмоприёмников; интерференция многократных волн в тонких слоях геологических сред; низкочастотный фильтр с граничной частотой, зависящей от свойств грунта, состоящий из сейсмоприёмника, присоединённой массы грунта и контакта между ними. В [3, 4, 17] к этим причинам добавлена ещё одна, связанная с якобы частотно-зависимым (6 дБ на октаву) поглощением сейсмического сигнала геологической средой. Но, как показано в статье [10], такой вывод сделан на основании



результатов полевых работ, проведённых с электродинамическими сейсмоприёмниками скорости, уменьшающими амплитуды сейсмических сигналов обратно пропорционально увеличению частоты.

Рекомендация по увеличению разрешающей способности сейсморазведки дана в [17]: "Чтобы добиться более высокой разрешенности, нужно расширить полосу пропускания в сторону высоких частот, поскольку как вертикальная, так и горизонтальная разрешающие способности определяются высокочастотными компонентами". Там же, для увеличения разрешающей способности рекомендованы к применению дорогостоящие акселерометры. Пояснения к этой рекомендации дано позднее в [14]: "если вибратор развивает квазигармонические силовые нагрузки постоянной амплитуды, то скорость перемещения частиц упругой среды будет убывать с ростом частоты. С этих позиций электродинамический сейсмоприёмник уже не является оптимальным, так как он приводит к закономерному уменьшению амплитуд волн с ростом частоты по линейному закону". Вывод подтверждён практикой работ, проводимых с вибрационными источниками. В 2005 году были проведены теоретические исследования дискретной модели упругой среды [10]. В результате этих исследований была вычислена передаточная функция такой модели. На основании полученной передаточной функции сделан вывод о том, что сила, возбуждённая сейсмическим источником, передаётся в сейсмогеологической среде со скоростью, определяемой волновым уравнением, и, достигнув сейсмоприёмника, приводит его корпус в движение с ускорением, пропорциональным воздействию силы источника. Для входных сигналов, пропорциональных ускорениям смещений сейсмических волн в изучаемой среде, АЧХ оптимального сейсмоприёмника в рабочем диапазоне частот должна быть параллельна оси частот, АЧХ же электродинамического сейсмоприёмника скорости с передаточной функцией (2) в виде равнобокого треугольника (рисунок 5) с вершиной на частоте свободных колебаний, имея до и после этой частоты крутизну среза 6 дБ на октаву, снижает уровень как низкочастотных, так и высокочастотных составляющих сейсмического сигнала и, тем самым, уменьшает потенциальную разрешающую способность принимаемых сейсмических данных.

В электродинамическом сейсмоприёмнике можно обеспечить выходной сигнал, пропорциональный ускорению колебаний. Любой сейсмоприёмник со степенью затухания более единицы приобретает свойства сейсмоприём-



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ: НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

МОИ УНИВЕРСИТЕТЫ

ника ускорений в частотном диапазоне тем более широком, чем больше степень затухания. Впервые электродинамический сейсмометр ускорений ОСП-2 был создан сотрудником Института Физики Земли Токмаковым В.А. В 1972 г. Токмаков В.А. разработал теоретические основы работы ОСП-2 в частотном диапазоне от долей до первых единиц Герц и получил соотношение для расчёта параметров такого сейсмометра [13]. Из-за увеличения индуктивной связи между каркасом и обмоткой катушки в частотном диапазоне сейсмических сигналов от единиц до первых сотен Герц эти соотношения не могут быть использованы для расчёта сейсмоприёмника ускорений.

В обычном сейсмоприёмнике степень затухания не превышает 0,7. Если степень затухания увеличить до значения, превышающего единицу, то множитель $(\tau_0^2 p^2 + 2\beta\tau_0 p + 1)$ знаменателя передаточной функции электродинамического сейсмоприёмника в формуле (2) вырождается в произведение передаточных функций двух аperiодических звеньев:

$$\left((1 + \sqrt{1 - 1/\beta^2}) \beta\tau_0 p + 1 \right) \cdot \left((1 - \sqrt{1 - 1/\beta^2}) \beta\tau_0 p + 1 \right).$$

Так как $1/\beta^2$ значительно меньше единицы, то, воспользовавшись известным упрощением: $\sqrt{1+x} \approx 1+x/2$, когда $x \ll 1$, получим:

$$(2\beta\tau_0 p + 1) ((\tau_0/2\beta)p + 1).$$

Подставив это выражение в (2) и приняв сопротивление шунта равным бесконечности, найдём:

$$W(p) = \frac{K_{\text{п}} \tau_0^2 p^2}{(2\beta\tau_0 p + 1)} \cdot \frac{1}{(\tau_0 p/2\beta + 1)} \cdot \frac{2\tau_2 p + 1}{\tau_2 p + 1} \quad (3)$$

Сигнал на выходе такого сейсмоприёмника в частотном диапазоне от нижней частоты частотного диапазона $\omega_H = 1/2\beta\tau_0 = \omega_0/2\beta$ до его верхней частоты $\omega_B = 2\beta/\tau_0 = 2\beta\omega_0$ пропорционален второй производной перемещения корпуса сейсмоприёмника. Этот частотный диапазон D_ω будет выражаться формулой:

$$D_\omega = \frac{\omega_B}{\omega_H} = \frac{\omega_0 2\beta}{\omega_0/2\beta} = 4\beta^2. \quad (4)$$

Сейсмоприёмник с частотой свободных колебаний 25 Гц и степенью затухания 5 будет иметь частотный диапазон от 2,5 до 250 Гц. Такой частотный диапазон соответствует требованиям, предъявляемым к сейсмическому каналу записи в [17]. В сравнении с сейсмоприёмником скорости, сейсмоприёмник с участком АЧХ пропорциональным ускорению колебаний в частотном диапазоне от 2,5 до 250 Гц, должен обеспечивать более высокую разрешающую способность. Такой электродинамический сейсмоприёмник ускорений создан во ВНИИГеофизике [12]. Это сейсмоприёмник трехкомпонентных ускорений (СТУ). Расчёт и конструкция преобразователя СТУ рассмотрены в [9]. Электродинамические сейсмоприёмники ускорений стали новым направлением в развитии электродинамических приборов для сейсморазведки. Они обеспечивают наивысшую разрешающую способность сейсмического сигнала, излу-

чаемого источником, так как их выходные сигналы пропорциональны ускорению колебаний среды, а для таких сигналов их АЧХ имеет вид идеального полосового фильтра, согласованного со спектром сейсмического сигнала.

Динамический диапазон сейсмоприёмника. Сейсмический сигнал, наблюдаемый на выходе приёмника, осложнён помехой, превышающей полезный сигнал на 40-60 дБ. Если динамический диапазон сейсмического сигнала оценивается некоторыми геофизиками [3, 17] в 100-120 дБ, то вместе с помехой он превышает 160 дБ. Например, если сдвиг фазы сигнала в два раза меньше этого значения, то отношение реальной амплитуды перемещения грунта в 5-10-3 м с частотой 10 Гц вблизи источника возбуждения к измеренной амплитуде перемещения низкого уровня микросейсм 0,1-10-9 м с той же частотой в наиболее тихих местах Земли. Сейсмоприёмник должен иметь динамический диапазон, не меньший, чем сейсмический сигнал.

Спектральная плотность шума сейсмоприёмника. Воспринимаемый сейсмоприёмником наименьший уровень сейсмического сигнала можно найти по его спектральной плотности квадрата ускорений шума (спектральной плотности шума), создаваемой в электродинамическом сейсмоприёмнике механическим колебательным звеном и сопротивлением обмотки. Вводимое в сейсмоприёмник электромагнитное затухание исключает резонанс механического колебательного звена на частоте свободных колебаний, но создаёт его шум со спектральной плотностью, вычисляемой по взятой из [1] формуле, представленной в виде:

$$S_{(f)} = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{a^2}{\Delta f} = 4kT. \quad (5)$$

$$\frac{2\beta \cdot 2\pi f_0}{m} = 16\pi \cdot kT \cdot \frac{\beta f_0}{m}$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/ОК постоянная Больцмана, $T = 300$ ОК абсолютная температура, Δf рабочий частотный диапазон, Гц, β и f_0 определены в формуле (2).

Кроме выраженных формулой (5) шумов от тепловой энергии, создаваемой затуханием, на инерционное тело через демпфер передаются колебания корпуса, добавляя шумовые ускорения. В соответствии с формулой (5) наименьший тепловой шум будет иметь механическое колебательное звено, применяемое в узком рабочем частотном диапазоне с наименьшими степенью затухания и частотой свободных колебаний и с

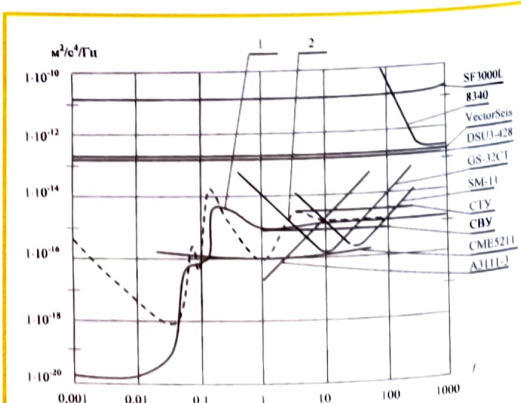


Рисунок 4. Спектральные плотности шума Земли и сейсмоприёмников. Линия 1 построена по графику спектральной плотности квадрата скорости шума Земли для "тихих" условий [1], а линия 2 построена по графику спектральной плотности квадрата перемещений шума Земли [15].

наибольшей массой инерционного тела.

В соответствии с предложениями, изложенными в статье [15], в сейсмологии спектральная плотность шума, создаваемого механическим колебательным звеном, должна быть на порядки меньше спектральной плотности шума Земли (рисунок 4, где сплошная линия 1 построена по графику спектральной плотности квадрата скоростей шума Земли для "тихих" условий [1], а пунктирная линия 2 построена по графику спектральной плотности квадрата перемещений шума Земли [15]).

Требования, предъявляемые наземной сейсмозапиской к спектральной плотности шума электродинамического сейсмоприёмника, значительно снижены. Суммарная спектральная плотность шума механического колебательного звена и сопротивления обмотки могут быть на уровне спектральной плотности техногенного фона Земли. И качество записи считается допустимым, когда наименьший сигнал, воспринимаемый сейсмоприёмником, равен шуму [17].

Сопроотивление обмотки катушки определяет наибольшую часть шума электродинамического сейсмоприёмника. Как известно [1], эффективное значение напряжения, создаваемого шумом можно рассчитать по формуле Найквиста:

$$U_{ш} = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (6)$$

где k , T и Δf определены в формуле (5), а R – сопротивление обмотки.

Воспользовавшись уравнениями $U_{ш} = K_{пу} \omega^2 x$ (где $K_{пу}$ – коэффициент преобразования по ускорению, В/м/с², а $\omega^2 x$ – ускорение колебаний шума, м/с²) и K (где $K_{пс}$ – коэффициент преобразования по скорости, В/м/с) и подставив их в формулу (6), после преобразований для $\omega \geq \omega_0$ получим спектральную плотность шума, создаваемого сопротивлением:

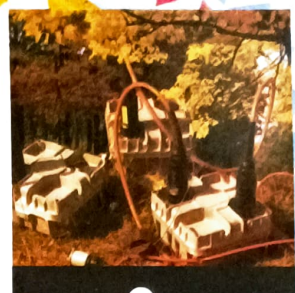
$$S_{(f)с} = \frac{\omega^4 x^2}{\Delta f} = \frac{4kTR\omega^2}{K_{пс}^2}. \quad (7)$$

Сложив $S_{(f)с}$ и $S_{(f)}$ геометрически, получим спектральную плотность шума, создаваемого электродинамическим сейсмоприёмником скорости. На рисунке 4 показаны спектральные плотности шума таких современных приёмников сейсмических сигналов, как: трёхкомпонентные аксе-

лерометры - VectorSeis фирмы Input/Output, SF3000L фирмы Applied MEMS, DSU3-428 фирмы Sersel; электронно-молекулярные сейсмометры - CME5211 и трёхкомпонентный A3111-3; пьезоэлектрический акселерометр 8340 фирмы Брюль и Квер; электродинамические сейсмоприёмники - GS-32CT фирмы Geo Space и SM-11 фирмы Sensor. В таблице 1 приведены технические характеристики этих приёмников сейсмических сигналов. На рисунке 4 также показаны спектральные плотности шума электродинамических сейсмоприёмников ускорений СВУ и СТУ, разработанных во ВНИИГеофизике. Их технические характеристики приведены в [6].

Повышение разрешающей способности выпускаемых электродинамических сейсмоприёмников. Чтобы повысить разрешающую способность электродинамических сейсмоприёмников, сделав их выходные сигналы пропорциональными ускорениям сейсмической волны, фирма Input/Output установила в каждом канале записи сейсмической станции Input/Output-2 спектральный фильтр (spectral shaping filter-SSF), обеспечивающий подъём коэффициента усиления предварительного усилителя в 6 дБ на октаву между заданными начальной и конечной частотами. Но полученная с помощью спектрального фильтра АЧХ сейсмоприёмника, ограниченная со стороны низких частот частотой его свободных колебаний и, таким образом, остаётся ограниченной и его разрешающая способность. Кроме того, спектральная плотность шума, создаваемая сейсмоприёмником, увеличивается пропорционально увеличению частоты.

Расширить частотный диапазон по ускорению в сторону низких частот можно так, как это сделала в 1987 году фирма Lennartz Electronic в электродинамическом сейсмоприёмнике LE-3D, создав в нём наибольшую степень затухания замыканием накоротко его обмотки инвертирующим входом операционного усилителя. Степень затухания замкнутого накоротко сейсмоприёмника GS-20DX равна $\beta = 1,74$ и тогда, в соответствии с формулой (4), его частотный диапазон по ускорению будет занимать полосу от 2,9 до 35 Гц. Обеспечив дифференцирование сигнала в частотном диапазоне от 35 до 250 Гц, получим сейсмоприёмник с частотным диапазоном по ускорению от 2,9 до 250 Гц. Недостатками этого способа преобразования АЧХ сейсмоприёмника являются: необходи-



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ: НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

МОИ УНИВЕРСИТЕТЫ

Таблица 1

Технические характеристики	Единица измерения	Обозначение приёмника								
		GS-32CT	GS-20DH	SM-11	A3111-3	СПАН-2	8340	VectorSeis	DSU3-428	SF3000L
Частотный диапазон	Гц	10-250	28-450	30-500	1-50	8-300	0,1-1500	0-1450	0-800	0-1000
Частота свободных колебаний	Гц	10	28	30	-	-	7000	-	-	-
Коэффициент преобразования	В/м/с ²	20	35	31	400	0	0	0	0	0
	В/м/с	0	0	0	0	2	1	-	-	0,12
Сопротивление обмотки	Ом	395	600	360	0	0	0	0	0	0
Степень затухания без шунта		0,316	0,57	0,55	-	-	-	-	-	-
Спектральная плотность шума	м ² /с ⁴ /Гц	-	-	-	-	-	2,25·10 ⁻¹⁰	1,9·10 ⁻¹³	1,6·10 ⁻¹³	1,6·10 ⁻¹¹
Наименьший входной сигнал	нм/с	0,2*	0,1*	0,1*	5	0	0	0	0	0
Наибольший входной сигнал	мм/с ²	0	0	0	0	-	25	4,4*	5*	0
	м/с ²	0	0	0	0	-	4,9	6,9	5	30
Динамический диапазон	дБ	160*	>160*	>160*	122	-	106*	124	120	120
Коэффициент нелинейных искажений	%	0,1	0,3	0,2	-	0,02	-	0,002	0,003	0,1
Предельный угол наклона	градус	20	90*	90*	15	-	-	180	180	0
Масса преобразовательного блока	кг	0,086	0,099	0,089	5,1▲	2,5	0,775	0,4▲	0,43▲	0,46▲
Напряжение питания	В	0	0	0	12	10-30	12	12	-	±6-±15
Потребляемый ток	мА	0	0	0	15	-	от 2 до 20	-	-	<30
Потребляемая мощность	мВт	0	0	0	-	-	-	-	300	0
Температурный диапазон	от минус	40	45	40	12	-	60	40	40	40
	до плюс	100	100	100	55	-	70	70	70	85

* – значение характеристики получено расчётом;
○ – несуществующая характеристика;

(-) – характеристика отсутствуют в рекламном листке;
▲ – масса трёхкомпонентного приёмника.

мость в источнике питания и повышение спектральной плотности шума сейсмоприёмника пропорционально увеличению частоты.

В патенте [11] для преобразования низкочастотной части АЧХ электродинамического сейсмоприёмника применено резонансное последовательное звено из индуктивности, конденсатора и сопротивления. Была предпринята попытка с помощью такого же звена преобразовать АЧХ по скорости в АЧХ по ускорению сейсмоприёмника SM-11 с частотой свободных колебаний 30 Гц. Находящейся посередине полосы видимых частот колебаний сейсмического сигнала от 10 до 80 Гц. Из-за того, что присоединяемое звено не является однонаправленным и между ним и преобразователем сейсмоприёмника возникают дополнительные связи, искажающие получаемую АЧХ, не удалось достичь желаемого результата. Развязав сейсмоприёмник и резонансное звено усилителем, получим положительное решение задачи, но с добавлением источника питания. Лучшее же решение задачи по повышению разрешающей способности сейсморазведки с помощью сейсмоприёмника SM-11 (или GS-20DH) получим, применив в канале записи сейсмической станции (или при обработке) цифровой фильтр с АЧХ:

$$W(f) = \frac{K_y \sqrt{[1 - (f/f_0)^2]^2 + (2\beta f/f_0)^2}}{\sqrt{1 + [f/(f_0/10)]^2} \sqrt{1 + [f/(10 f_0)]^2}}, \quad (8)$$

где K_y – коэффициент усиления, f – текущая частота, f_0 – частота свободных колебаний сейсмоприёмника, β – его степень затухания.

Приняв сопротивление шунта равным бесконечности и отбросив передаточную функцию формирующего апериодического звена в уравнении (2), найдём из него АЧХ по ускорению и, умножив её на АЧХ, выраженную формулой (8), получим:

$$W(f) = \frac{U_{\text{вып}}}{\ddot{x}_k} = \frac{K_n K_y}{2\pi f_0} \cdot \frac{f/f_0}{\sqrt{1 + [f/(f_0/10)]^2} \cdot \sqrt{1 + [f/(10 f_0)]^2}}. \quad (9)$$

На рисунке 5 показаны АЧХ СТУ и преобразованная АЧХ сейсмоприёмника SM-11, построенная по формуле (9). АЧХ совпадают, но спектральные плотности шумов сейсмоприёмников будут отличаться. Спектральная плотность шума у СТУ имеет вид параллельной оси частот линии, изображённой на рисунке 4, а у SM-11 – увеличивается с понижением частоты от 14 Гц и повышением частоты от 60 Гц пропорционально отрезкам ординат между АЧХ SM-11 и преобразованной АЧХ.

Заключение. Как показали исследования, проведённые в этой статье, требованиям наземной сейсморазведки к разрешающей способности приёмников сейсмических сигналов, включаю-

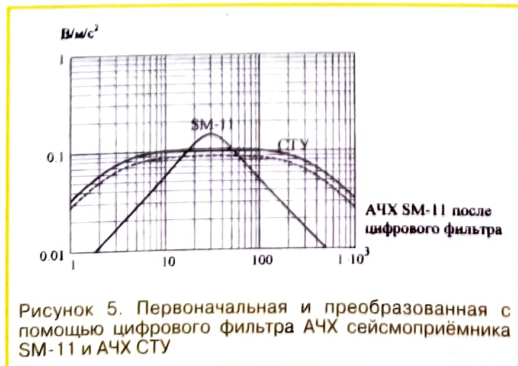


Рисунок 5. Первоначальная и преобразованная с помощью цифрового фильтра АЧХ сейсмоприёмника SM-11 и АЧХ СТУ

щим: пропорциональность выходных сигналов сейсмоприёмников ускорениям колебаний среды в частотном диапазоне от 3 до 100 Гц, динамический диапазон в 160 дБ и спектральную плотность шума на уровне техногенного шума Земли – в настоящее время в полной мере не удовлетворяют только электродинамическим сейсмоприёмникам. Всем этим требованиям отвечает сейсмоприёмник трёхкомпонентный ускорений СТУ. Но его главный недостаток заключается в отсутствии серийного производства. Поэтому следует дожидаться того времени, когда будет создано геофизическое приборостроение, которое будет независимым и возможно тогда. А до той поры лучше всего применять сейсмоприёмники SM-11 (или GS-20DH) с цифровыми фильтрами в канале записи или при обработке.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Аки, П. Ричардс. Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983.
2. Арнольд Р.Р. Расчёт и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия. – 1969.
3. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. – М.: Недра. – 1980.
4. Пузырёв Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. – Новосибирск: Издательство СО РАН НИЦ ОИГМ. – 1997.
5. Рыжов А.В. Анализ развития теории сейсмоприёмников. // Геофизика. – М.: Издательство ГЕРС. – 1999. – № 5.
6. Рыжов А.В. Анализ свойств сейсмоприёмников. // Геофизика. – М.: Издательство ГЕРС. – 2003. – № 4.
7. Рыжов А.В. К теории электродинамического сейсмоприёмника. // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: Издательство Полиграф-Депо. – 2007. – № 1.
8. Рыжов А.В. Новая методика расчёта электродинамического преобразовательного блока сейсмоприёмника. // Прикладная геофизика. М.: Недра. – 1992. – Выпуск 126.
9. Рыжов А.В. Новый электродинамический сейсмоприёмник ускорений. // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: Издательство Полиграф-Депо. – 2002. – № 2.
10. Рыжов А.В. Распространение волн в дискретной модели упругой среды. // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 2-3.
11. Рыжов А.В. 1996. Сейсмоприёмное устройство. Патент РФ 2054700. Б.И., 5.
12. Рыжов А.В. Электродинамический трёхкомпонентный сейсмоприёмник ускорений. // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов: Издательство Полиграф-Депо. – 2004. – № 4.
13. Токмаков В.А. О сейсмических приборах с большим затуханием. // Сейсмические приборы. – М.: Наука. – 1977. – Выпуск № 10.
14. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки. Под редакцией Шнейерсона М.Б. – М.: Недра. – 1998.
15. Трифонов Н.В. Вопросы построения чувствительной сейсмической аппаратуры. // Сейсмические приборы. – М.: Наука. – 1988. – Выпуск № 20.
16. Шведчиков Л.К. Графоаналитический расчёт электродинамического сейсмоприёмника // Прикладная геофизика. – М.: Недра. – 1975. – Выпуск 77.
17. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. Том 1. – М.: Мир. – 1987.