



Электродинамический трехкомпонентный сейсмоприемник ускорений

Рыжов А.В., ВНИИГеофизика, г. Москва

В последние годы интенсивно развивается метод многоволновой сейсморазведки (МВС), основанный на совместном применении продольных, поперечных и обменных волн. В настоящее время технология МВС нуждается в новом поколении технических средств, в том числе и в сейсмоприемниках. Разработанные много лет назад электродинамические трехкомпонентные сейсмоприемники такие, как GS-3С фирмы Geo Space, PE-6/B фирмы Sensor и новый трехкомпонентный сейсмоприемник фирмы Sersel имеют несколько недостатков. Один из них заключается в том, что сейсмоприемники теряют работоспособность при небольших углах наклона (в рекламных листках этот параметр отсутствует). Еще при меньших углах наклона их КНИ выходят за допустимые пределы. Этот недостаток можно было бы устранить, установив в сейсмоприемниках преобразовательные блоки с частотой свободных колебаний 25 - 30 Гц, но стремление к расширению рабочего частотного диапазона вынуждает фирмы применять преобразовательные блоки с частотой свободных колебаний не более 10 Гц. Горизонтальные преобразовательные блоки с такой частотой теряют работоспособность при наклоне на несколько градусов. Поэтому на верхней поверхности сейсмоприемников располагают указатели уровня для точной ориентации сейсмоприемников в горизонтальной плоскости, усложняя работу по их установке в грунт. В трехкомпонентном сейсмоприемнике VectorSeis, разрабатываемый фирмой Input/Output, устранен отмеченный недостаток. Прибор измеряет свой угол наклона, сохраняя работоспособность в любом положении. Фирма, называя VectorSeis акселерометром, представила в [8] его АЧХ, совпадающую с рабочим участком АЧХ известных электродинамических сейсмоприемников. Частотный диапазон VectorSeis, определенный по его АЧХ, имеет по сравнению с электродинамическим сейсмоприемником улучшенную низкочастотную часть. В своих рекламных листках Input/Output не приводит ни графика АЧХ, ни коэффициента преобразования, а указанная величина динамического диапазона VectorSeis (105 дБ) значительно меньше динамического диапазона сейсмического канала записи современной телеметрической станции (140 дБ) и электродинамического сейсмоприемника (146 дБ).

Главный же недостаток рассмотренных сейсмоприемников заключается в том, что их АЧХ не совпадает со спектром сейсмического сигнала. Проведенные в последнее время сейсмические исследования, с вибрационными источниками [6, 9], выявили преимущества применения в сейсморазведке акселерометров или сейсмоприемников ускорений (выходные сигналы, пропорциональны ускорениям перемещений изучаемой среды) в сравнении с применяемыми электродинамическими сейсмоприемниками скорости (выходные сигналы, пропорциональны скорости перемещений среды). Увеличение разрешающей способности сейсмоприемника ускорений можно объяснить тем, что для спектров

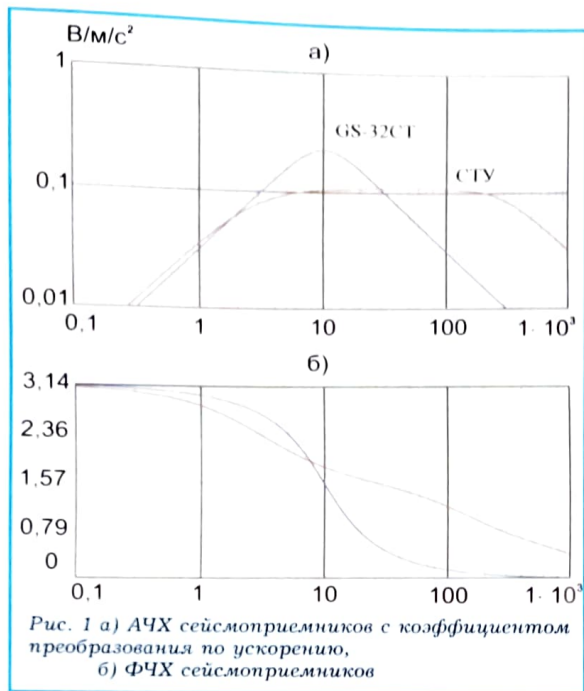
сигналов сейсмических вибрационных источников его АЧХ совпадает с АЧХ согласованного фильтра. Ни АЧХ сейсмоприемника скорости и, тем более, АЧХ сейсмоприемника перемещений не согласованы со спектрами сигналов сейсмических источников. Можно дать и другое объяснение увеличению разрешающей способности сейсмоприемника ускорений, рассматривая изучаемую геологическую среду как информационный канал [1], передающий сигнал от вибрационного источника, установленного на входе канала, к сейсмоприемнику, установленному на его выходе. Если не учитывать уменьшение уровня сигнала с увеличением расстояния из-за расхождения фронта волны, то можно сделать предположение о том, что передаточная функция такого канала равна единице. Обеспечив постоянную амплитуду периодической силы, прилагаемой к излучающей плите вибратора для любой частоты сигнала, получим в соответствии с основным законом механики на поверхности наблюдения, где установлен сейсмоприемник, выходной сигнал, пропорциональный ускорению перемещений. Сейсмоприемник ускорений преобразует эти сигналы без искажений, а вот сейсмоприемник скорости с АЧХ в виде равнобедренного треугольника с вершиной на частоте свободных колебаний (рис. 1а), 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 информационного канала.

В перечень основных технических требований, предъявляемых к новым разрабатываемым трехкомпонентным сейсмоприемникам для МВС, первым должно входить требование о том, что выходные сигналы преобразовательных блоков сейсмоприемника должны быть пропорциональны ускорениям перемещений изучаемой среды в частотном диапазоне, перекрывающем частотный диапазон сейсмического сигнала. Этот перечень должен содержать такие требования, как расположение осей максимальной чувствительности преобразовательных блоков по осям прямоугольной системы координат XYZ; наибольший коэффициент преобразования; наименьшая амплитуда воспринимаемого ускорения, по крайней мере, в два раза меньше амплитуды ускорения, преобразованного сейсмоприемником в напряжение, равное напряжению, создаваемому в сейсмическом канале записи собственным шумом, приведенным к входу канала; динамический диапазон, перекрывающий диапазон сейсмического сигнала; малый коэффициент нелинейных искажений; большой предельный угол наклона; наименьшая масса сейсмоприемника.

В соответствии с этими требованиями во ВНИИГеофизике разработан новый электродинамический трехкомпонентный сейсмоприемник ускорений или сейсмоприемник трехкомпонентных ускорений (СТУ). Конструкция преобразовательного блока СТУ рассмотрена в [2].



ИННОВАЦИИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Основные свойства СТУ определяет передаточная функция его преобразовательного блока. Найдем передаточную функцию этого блока из его электромеханической схемы, взятой из [4] и изображенной на рис. 2. (В схеме не учтены емкости между обмоткой и короткозамкнутым каркасом, между обмотками и корпусом, а также распределенные емкости между витками обмоток). На схеме обозначены: генератор переменной внешней силы - F , масса преобразовательного блока - m , масса катушки - M , жесткость пружины - K , перемещение преобразовательного блока - X_k , относительное перемещение магнитной системы преобразовательного блока и катушки - X_p . Электродинамические преобразователи двух обмоток (каждая с коэффициентом преобразования K_m) преобразуют скорость относительного перемещения магнитной системы преобразовательного блока и катушки в ЭДС, развиваемые на концах обмоток. Каждая обмотка имеет индуктивность L_i , сопротивление R_i и количество витков n_i . Выходной сигнал сейсмоприемника без шунтирующего сопротивления равен сумме ЭДС, создаваемых двумя последовательно соединенными обмотками, а с сопротивлением R_m равен напряжению, производимому током I_p , протекающим через R_m . Каждый из двух электродинамических преобразователей короткозамкнутых каркасов катушки, имеющий коэффициент

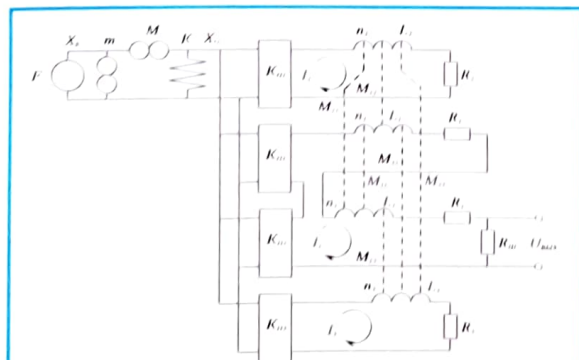


Рис. 2 Электромеханическая схема сейсмоприемника

преобразования K_{m12} , индуктивность L_{12} и сопротивление R_{12} , преобразует скорость относительного перемещения магнитной системы и катушки в ток I_p . Токи I_p , протекающие в двух каркасах, обеспечивают заданную степень затухания в сейсмоприемнике. Обмотки и каркасы вместе с магнитной системой составляют трансформатор. В [4] установлено, то, что наибольшие взаимные индуктивности M_{12} в этом трансформаторе имеют обмотка и каркас, расположенные в одном воздушном зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, полюсным наконечником, установленным на постоянном магните, и полюсным наконечником, установленным в магнитопроводе магнитной системы. Наименьшие взаимные индуктивности имеют обмотка-обмотка M_{11} , каркас-каркас M_{22} , и обмотка-каркас M_{21} и M_{12} , расположенные в разных воздушных зазорах. Каждая из взаимных индуктивностей M_{11} , M_{22} , M_{21} или M_{12} более чем на порядок меньше M_{12} . Последнее объясняется тем, что магнитная цепь этих связей включает постоянный магнит, имеющий магнитную проницаемость, превышающую магнитную проницаемость воздуха всего лишь в 2 - 3 раза. Экспериментальные исследования показали, что коэффициент индуктивной связи K_c между обмотками, расположенными в разных воздушных зазорах магнитной системы, составляет не более 0,05. Коэффициент индуктивной связи между теми же обмотками, расположенными в одном воздушном зазоре той же магнитной системы, выражается известным отношением:

$$K_c^2 = M_{12}^2 / L_1 L_2 \quad (1)$$

близким к единице. Поэтому, пренебрегая в первом приближении взаимными индуктивностями M_{11} , M_{22} , M_{21} и M_{12} , составим сигнальный граф сейсмоприемника, изображенный на рис. 3. В сравнении с электромеханической схемой сигнальный граф наиболее полно отражает связи, существующие в сейсмоприемнике, и является геометрическим изображением системы уравнений, представленных передаточными функциями его ветвей. Применяя способ последовательного упрощения графа, или по правилу Мейсона (S.J. Mason), найдем из сигнального графа сейсмоприемника его передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{U_{max}}{pX_k} = \frac{acd(2b + 2fg)}{1 + 2bcep(2b + 2fg) + efp(2bh + 2f)} \quad (2)$$

В передаточной функции (2) учтено то, что обратные связи $2bcep(2b + 2fg)$ и $efp(2bh + 2f)$ - отрицательные. Отрицательный знак обратной

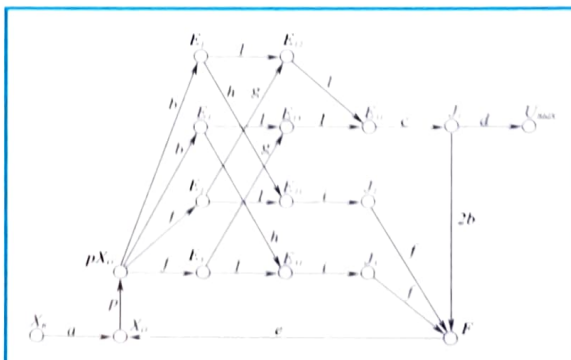
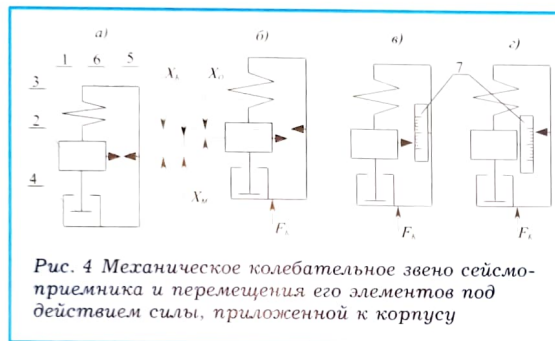


Рис. 3 Сигнальный граф сейсмоприемника



связи определяется тем, что ток, возникающий в обмотках или короткозамкнутых каркасах при движении катушки в магнитном поле воздушных зазоров магнитной системы, создает силу, препятствующую этому относительному движению.

В сейсмоприемнике основным является механическое колебательное звено. Звено изображено на рис. 4. С корпусом 1 соединена пружина 2. Второй конец пружины связан с инерционным телом 3. Демпфер 4 осуществляет затухание свободных колебаний инерционного тела относительно корпуса. Жесткость пружины равна K , масса инерционного тела равна M , а затухание, создаваемое демпфером, пропорционально коэффициенту H . Указатели 5, 6 и шкала 7 позволяют наблюдать относительные перемещения корпуса и инерционного тела. Механическое колебательное звено применяется в сейсмоприемнике, как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.



Входной сигнал механического колебательного звена, действующего в режиме двигателя, - это сила F , приложенная к инерционному телу, а выходной сигнал звена - перемещение инерционного тела относительно корпуса X_o , равное в этом режиме X_m . В режиме двигателя уравнение движения механического колебательного звена имеет известный [5] вид:

$$M\ddot{X}_o + H\dot{X}_o + KX_o = F \quad (3)$$

Придадим уравнению движения (3) операторную форму записи и из нее найдем передаточную функцию механического колебательного звена как отношение сигнала на выходе звена X_o к силе F :

$$W(p) = \frac{X_o}{F} = \frac{1}{K(t_0^2 p^2 + 2bt_0 p + 1)} \quad (4)$$

где $t_0 = 1/\omega_0 = \sqrt{M/K}$ - постоянная времени звена; $b = H/(2Kt_0)$ - степень затухания; $\omega_0 = 2\pi f_0$ - круговая частота свободных колебаний; f_0 - частота свободных колебаний.

Входной сигнал механического колебательного звена, действующего в режиме генератора, - это перемещение корпуса X_k (или его производные), а выходной сигнал звена - относительное перемещение инерционного тела и корпуса - X_o (или его производные). Дифференциальное уравнение движения механического колебательного звена в режиме генератора может быть получено как в инерциальной системе координат (находящейся в состоянии покоя или движущейся с постоянной скоростью), так и в неинерциальной системе (движущейся с ускорением). Вывод уравнения движения в неподвижной инерциальной системе звена начнем с того, что приложим постоянную силу к корпусу

неподвижного звена, находящегося в состоянии покоя. Это состояние выбрано потому, что в таком положении звена известны начальные условия: скорости равны нулю, а пройденный путь от начала координат как корпуса, так и инерционного тела в момент времени t , также равен нулю. Если же рассматривать движение корпуса и инерционного тела в произвольный момент времени, то необходимо знать или уметь вычислить, или измерить параметры их движений: пройденные пути и скорости. Под действием постоянной силы за сколь угодно малый промежуток времени t корпус, двигаясь равноускоренно, начнет разгонять инерционное тело растягиваемой пружиной и силой, создаваемой вязким трением. Рассматриваемый промежуток времени t можно взять и не бесконечно малым, но не более доли постоянной времени звена. В тот момент времени, когда пружина растянется на величину, равную $X_o = \dot{X}_o t^2/2$, она создаст силу, равную KX_o . В этот же момент времени скорость перемещения корпуса относительно инерционного тела будет равна $\dot{X}_o = \dot{X}_o t$ и вязкое трение создаст силу, также приложенную к инерционному телу и равную $H\dot{X}_o$. Под действием суммы этих двух сил инерционное тело в рассматриваемый момент времени будет двигаться с ускорением $\ddot{X}_m$, определяемым основным законом механики:

$$M\ddot{X}_m = H\dot{X}_o + KX_o \quad (5)$$

Уравнение (5) справедливо для равноускоренного движения механического колебательного звена, начавшего это движение из начального положения - состояния покоя под действием на корпус звена постоянной силы. И такого понимания уравнения (5) достаточно для последующего получения дифференциального уравнения движения звена.

Если равноускоренное движение звена будет продолжаться достаточно долго, то тогда, после окончания переходного процесса, ускорение инерционного тела $\ddot{X}_m$ станет равным ускорению корпуса $\ddot{X}_k$. А в начале переходного процесса в промежуток времени, составляющий долю постоянной времени звена, ускорение $\ddot{X}_m$ будет меньше ускорения $\ddot{X}_k$ на величину ускорения перемещения корпуса относительно инерционного тела $\ddot{X}_o$ и, следовательно, будет справедливо равенство:

$$\ddot{X}_m = \ddot{X}_k - \ddot{X}_o \quad (6)$$

Подставив в (5) вместо ускорения $\ddot{X}_m$ его выражение из (6), получим дифференциальное уравнение движения механического колебательного звена в режиме генератора в инерциальной системе координат:

$$M\ddot{X}_o + H\dot{X}_o + KX_o = M\ddot{X}_k \quad (7)$$

Изложенный способ вывода дифференциального уравнения движения механического колебательного звена не требует применения равенства, связывающего перемещения X_k , X_m и X_o . Это равенство можно получить, дважды проинтегрировав уравнение (6) и определив постоянные интегрирования из начальных условий (когда время равно нулю, тогда и все перемещения и скорости равны нулю).

Правая часть дифференциального уравнения движения механического колебательного звена



(7) содержит положительный знак и это явно не инвертирует входной сигнал. Соединив механическое колебательное звено с преобразователем, получим сейсмоприемник. В зависимости от присоединенного преобразователя сейсмоприемник будет инвертировать или не инвертировать входной сигнал. На рис. 4 изображены "наблюдательные" преобразователи: инвертирующий - в виде шкалы, размещенной на корпусе (рис. 4в), и неинвертирующий - в виде шкалы, размещенной на инерционном теле (рис. 4г).

Итак, правая часть дифференциального уравнения движения механического колебательного звена может быть только положительной.

Придадим уравнению движения (7) операторную форму записи и из этой формы уравнения найдем передаточную функцию механического колебательного звена как отношение сигнала на выходе звена X_o к входному сигналу X_i :

$$W(p) = \frac{X_o}{X_i} = \frac{\tau_0^2 p^2}{\tau_0^2 p^2 + 2\beta\tau_0 p + 1} \quad (8)$$

Приравняв нулю степень затухания в передаточной функции (8), получим передаточную функцию ветви а:

$$a = \frac{X_o}{X_i} = \frac{\tau_0^2 p^2}{\tau_0^2 p^2 + 1} \quad (9)$$

Ветвь б имеет передаточную функцию электродинамического преобразователя одной обмотки и выражается формулой:

$$b = \frac{E_1}{pX_o} = K_{m1} \quad (10)$$

Ветвь д отображает передаточную функцию сопротивления шунта:

$$d = \frac{U_{вых}}{I_1} = R_{ш} \quad (11)$$

Приравняв нулю степень затухания в передаточной функции (4), получим передаточную функцию ветви е:

$$e = \frac{X_o}{F} = \frac{1}{K(\tau_0^2 p^2 + 1)} \quad (12)$$

Ветвь ф отображает передаточную функцию электродинамического преобразователя одного короткозамкнутого кольца:

$$f = \frac{E_2}{pX_o} = \frac{F}{I_2} = K_{m2} \quad (13)$$

Ветвь р выражается передаточной функцией дифференцирующего оператора:

$$p = \frac{pX_o}{X_o} = \frac{d}{dt} = j\omega \quad (14)$$

Передаточную функцию ветви с, входной проводимости трансформатора со стороны двух обмоток, соединенных последовательно, найдем из системы уравнений, составленных по электро-механической схеме сейсмоприемника (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= I_1(2R_1 + 2L_1 p + R_{ш}) + I_2 M_{12} p + I_3 M_{13} p \\ 0 &= I_1 M_{12} p + I_2(R_2 + L_2 p) \\ 0 &= I_1 M_{13} p + I_3(R_3 + L_3 p) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Решив систему уравнений (15), после преобразований получим:

$$c = \frac{I_1}{E_{11}} = \frac{1}{R + R_{ш}} \cdot \frac{\tau_1 p + 1}{\tau_1 \tau_2 (1 - K_c^2) p^2 + (\tau_1 + \tau_2) p + 1} \quad (16)$$

где $R = 2R_1$, $\tau = 2L_1 / (R + R_{ш})$, $\tau_1 = L_1 / R = L_1 / R$.

Полагая K_c из (1) равным единице, получим:

$$c = \frac{1}{R + R_{ш}} \cdot \frac{\tau_1 p}{(\tau_1 + \tau_2) p + 1} \quad (17)$$

Аналогично найдем передаточную функцию ветви г, входной проводимости трансформатора со стороны короткозамкнутого каркаса, из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} E_{21} &= I_1 M_{12} p + I_2(R_2 + L_2 p) \\ 0 &= I_1(2R_1 + 2L_1 p + R_{ш}) + I_2 M_{12} p + I_3 M_{13} p \\ 0 &= I_1 M_{13} p + I_3(R_3 + L_3 p) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где E_{21} - сумма ЭДС короткозамкнутого каркаса и ЭДС, передаваемой индуктивной связью обмотка-каркас.

Решив систему уравнений (18), получим:

$$i = \frac{I_2}{E_{21}} = \frac{1}{R_2} \cdot \frac{0,5\tau_1\tau_2 p^2 + (\tau_1 + \tau_2)p + 1}{(\tau_1 p + 1)[(\tau_1 + \tau_2)p + 1]} \quad (19)$$

Передаточную функцию ветви г, индуктивной связи короткозамкнутого каркаса катушки с обмоткой, найдем из системы уравнений, составленных по электро-механической схеме сейсмоприемника (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} E_2 &= I_2(R_2 + L_2 p) \\ E_{12} &= I_2 M_{12} p \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Ток протекает только в контуре, содержащем ЭДС E_2 . В двух других контурах ток отсутствует.

Решив систему уравнений (20), получим:

$$g = \frac{E_{12}}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{\tau_2 p}{\tau_2 p + 1} \quad (21)$$

Аналогично найдем передаточную функцию ветви h, индуктивной связи обмотки с короткозамкнутым каркасом, из системы уравнений, составленных по электро-механической схеме сейсмоприемника (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= I_1(2R_1 + 2L_1 p + R_{ш}) + I_3 M_{13} p \\ 0 &= I_1 M_{13} p + I_3(R_3 + L_3 p) \\ E_{21} &= I_1 M_{12} p \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Ток в разомкнутом контуре, содержащем ЭДС E_{21} , отсутствует. Решив систему уравнений (22), получим:

$$h = \frac{E_{21}}{E_1} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{0,5\tau_1\tau_2(\tau_1 p + 1)}{0,5\tau_1\tau_2 p^2 + (\tau_1 + \tau_2)p + 1} \quad (23)$$

Необходимо отметить одну особенность полученных передаточных функций (21), (23). В них отсутствует отрицательный знак. Ранее в [4] было сделано предположение о том, что индуктивная связь, действующая в электро-динамическом сейсмоприемнике между каркасом и обмоткой катушки, поворачивает фазу сигнала на 180°. Это предположение позволило упростить промежуточные преобразования и снизить степень многочлена знаменателя передаточной функции сейсмоприемника. Вычисленная передаточная функция сейсмоприемника скорости и построенная по ней АЧХ совпали с полученной ранее в [7] другим способом передаточной функцией и АЧХ такого же сейсмоприемника. Совпадение результатов теоретических исследований, казалось, подтвердили сделанное предположение. Но проведенные в дальнейшем новые теоретические исследования, а затем и экспериментальные выявили индуктивная связь, действующая в электро-динамическом сейсмоприемнике между каркасом и обмоткой катушки, не поворачивает фазу сигнала на 180°. Поэтому вывод передаточ-



ной функции сейсмоприемника в настоящей работе, начиная с системы уравнений (20), отличается от вывода, проведенного в [4].

Итак, получив передаточные функции всех ветвей сигнального графа, изображенного на рис. 3, найдем передаточную функцию преобразовательного блока электродинамического сейсмоприемника, подставив значение ветвей из (9) – (14), (17), (19), (21) и (23) в сигнальный граф (2).

$$W(p) = \frac{U_{\text{вых}}}{pX_k} = \frac{R_{\text{ш}}}{R + R_{\text{ш}}} \cdot \frac{K_{\text{ш}} \tau_0^2 (2\tau_2 p + 1) \cdot (\tau_0 p + 1) p^2}{\Sigma} \quad (24)$$

где $K_{\text{ш}} = 2K_{\text{ш}}'$; $R = 2R_0$;

$$\Sigma = p^4 \tau_0^2 (\tau_1 + \tau_2) \tau_2 + p^3 \tau_0^2 \left[2\beta_1 \cdot \frac{\tau_2^2}{\tau_0} + 2\beta_2 \cdot \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_0^2} + \frac{\tau_1 + 2\tau_2}{\tau_0} \right] +$$

$$+ p^2 \tau_0^2 \left[1 + 2\beta_1 \cdot \frac{3\tau_2}{\tau_0} + \beta_2 \cdot \frac{3\tau_1 + 2\tau_2}{\tau_0} + \frac{\tau_2 (\tau_1 + \tau_2)}{\tau_0^2} \right] +$$

$$+ p \tau_0^2 \left(2\beta_1 + 2\beta_2 + \frac{\tau_1 + 2\tau_2}{\tau_0} \right) + 1$$

– многочлен четвертой степени, где $\beta_1 = K_{\text{ш}}^2 \tau_0 / 2m(R + R_{\text{ш}})$ – степень затухания сейсмоприемника от тока, протекающего через обмотку; $\beta_2 = K_{\text{ш}}^2 \tau_0 / 2mR_0$ – степень затухания, обеспечиваемая током в одном короткозамкнутом каркасе.

Определение параметров и анализ системы с передаточной функцией, представленной в виде (24), затруднительны. Как известно из теории автоматического управления [5], для того, чтобы определить параметры системы, ее передаточную функцию представляют в виде произведения передаточных функций элементарных звеньев. С этой целью многочлены числителя и знаменателя разлагают на простые (не выше второго порядка) множители вида τp , $(\tau p + 1)$, $(\tau p^2 + 2\beta \tau p + 1)$, соответствующие передаточным функциям элементарных звеньев (дифференцирующему, апериодическому, колебательному и т.п.).

В многочлене знаменателя разрабатываемого сейсмоприемника τ и β будут равны нулю, т.к. сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$ бесконечно. Тогда:

$$\Sigma = \tau_0^2 \tau_2^2 p^4 + 2\tau_0^2 \tau_2 p^3 + \left(1 + 2\beta_2 \cdot \frac{\tau_2}{\tau_0} + \frac{\tau_2^2}{\tau_0^2} \right) \cdot \tau_0^2 p^2 +$$

$$+ \left(1 + \frac{\tau_2}{\beta_2 \tau_0} \right) \cdot 2\beta_2 \tau_0 p + 1 \quad (25)$$

Многочлен, близкий к Σ , имеет произведение передаточных функций

$$(\tau_0^2 p^2 + 2\beta_2 \tau_0 p + 1) \cdot (\tau_0 p + 1) \cdot (\tau_0 p + 1).$$

После умножения получим:

$$\Sigma_1 = \tau_0^2 \tau_2^2 p^4 + \left(1 + \frac{\tau_2}{\tau_0} \right) \cdot 2\tau_0^2 \tau_2 p^3 + \left(1 + 4\beta_2 \cdot \frac{\tau_2}{\tau_0} + \frac{\tau_2^2}{\tau_0^2} \right) \cdot \tau_0^2 p^2 +$$

$$+ \left(1 + \frac{\tau_2}{\beta_2 \tau_0} \right) \cdot 2\beta_2 \tau_0 p + 1 \quad (26)$$

Многочлен Σ из (25) будет иметь хорошее приближение к многочлену Σ_1 из (26) только тогда, когда $4\beta_2 \tau_2 / \tau_0$ будет значительно меньше единицы (или когда τ_2 будет стремиться к нулю). В разрабатываемом сейсмоприемнике реальная постоянная времени τ_2 имеет конечное значение, и многочлен Σ будет иметь другое, отличающееся от (26), разложение на простые множители. Значение τ_2 зависит от параметров двух короткозамкнутых каркасов и размеров воздушных зазоров:

$$\tau_2 = 2L_2 / R_2, \quad (27)$$

где L_2 / R_2 – постоянная времени, создаваемая одним каркасом. Сопротивление каркаса R_2 найдем по известной формуле: $R = \rho l / S$, а его индуктивность по формуле: $L_2 = G_2 n_2^2$, где $n_2^2 = 1$. Магнитная проводимость G будет составлять приблизительно четверть от магнитной проводимости $(\sigma - 1)G$ (две половины проводимости для магнитного потока, протекающего вне воздушного зазора, соединены последовательно). Магнитная проводимость G воздушного зазора найдем по известной формуле: $G = \mu l / \sigma \Delta$. Подставив полученную зависимость L_2 от проводимости G и зависимость R_2 от параметров каркаса, найдем:

$$\tau_2 = \frac{\mu_0 S L_2 \sigma (\sigma - 1)}{2 \Delta \rho} \quad (28)$$

Значение τ в первом приближении можно получить по формуле (28) уже разработанных сейсмоприемников. Подставив численные значения τ , τ и β в многочлен Σ и приравняв его нулю, можно найти корни полученного уравнения четвертой степени. Для разрабатываемого сейсмоприемника значение постоянной времени τ еще не известно. Составим ряд последовательно увеличивающихся значений τ . Выбрав значение частоты собственных колебаний 22 Гц ($\tau = 7,23 \cdot 10^{-5}$ с) и степени затухания 3,5 и задавшись наименьшим значением постоянной времени τ , равной $2 \cdot 10^{-5}$ с, составим уравнение для сейсмоприемника ускорений:

$$20,92 \cdot 10^{-15} p^4 + 20,92 \cdot 10^{-10} p^3 + 5,83 \cdot 10^{-5} p^2 +$$

$$+ 5,06 \cdot 10^{-2} p + 1 = 0$$

Сохраняя постоянными τ и β и последовательно увеличивая в два раза значение τ в многочлене Σ , составим ряд таких уравнений. Вычисленные корни этих уравнений представлены в таблице 1.

Таблица 1

τ_2 , с	Корни уравнения, с ⁻¹			
	X_1	X_2	X_3	X_4
$2 \cdot 10^{-5}$	-20,20	-966	-48607	-50406
$4 \cdot 10^{-5}$	-20,16	-989	-23732	-25259
$8 \cdot 10^{-5}$	-20,13	-1036	-11597	-12347
$16 \cdot 10^{-5}$	-20,12	-1176	-6264	-5040
$32 \cdot 10^{-5}$	-20,06	-3140	-1545-760i	-1545+760i
$64 \cdot 10^{-5}$	-19,90	-1582	-762-950i	-762+950i
$128 \cdot 10^{-5}$	-19,60	-805	-365-776i	-365+776i

Итак, получив разложение многочлена Σ для любых значений τ , найдем передаточную функцию преобразовательного блока сейсмо-

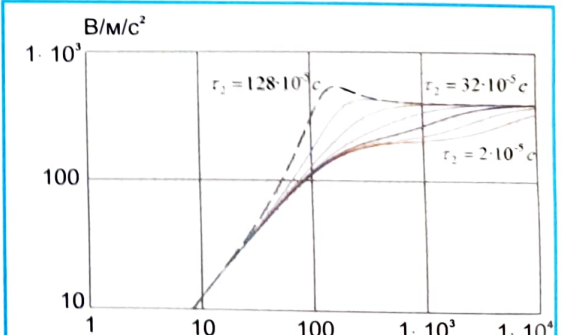


Рис. 5 АЧХ преобразовательного блока в зависимости от постоянной времени

приемника ускорений, подставив в (24) разложение Σ в виде произведения передаточных функций четырех аperiodических звеньев:

$$W(p) = \frac{K_{m0} \tau_0^2 (2\tau_2 p + 1) (\tau_2 p + 1) p^2}{(p X_1 + 1) \cdot (p X_2 + 1) \cdot (p X_3 + 1) \cdot (p X_4 + 1)} \quad (29)$$

Когда τ_2 имеет малые значения, тогда $1/X_3$ и $1/X_4$ становится приблизительно равными τ_2 (таблица 1). $1/X_1$ равным $\tau_0/2\beta_2$, а $1/X_2$ равным $\tau_0/2\beta_2$, и передаточная функция (29) принимает вид:

$$W(p) = \frac{K_{m0} \tau_0^2 (2\tau_2 p + 1) p^2}{(2\beta_2 \tau_0 p + 1) \cdot (\tau_0 p / 2\beta_2 + 1) \cdot (\tau_2 p + 1)} \quad (30)$$

У сейсмоприемника с передаточной функцией (30) участок частотного диапазона по ускорению перемещения становится равным $D_0 = 4\beta_2^2$.

Оценку частотных диапазонов при других значениях τ_2 проведем, построив АЧХ сейсмоприемников ускорений.

Формула АЧХ сейсмоприемника ускорений с передаточной функцией (29) будет иметь вид:

$$W(\omega) = \frac{K_{m0} \tau_0^2 \omega^2 \sqrt{2\tau_2^2 \omega^2 + 1} \cdot \sqrt{\tau_2^2 \omega^2 + 1}}{\sqrt{\omega^2 X_1^2 + 1} \cdot \sqrt{\omega^2 X_2^2 + 1} \cdot \sqrt{\omega^2 X_3^2 + 1} \cdot \sqrt{\omega^2 X_4^2 + 1}} \quad (31)$$

На рис. 5 изображены графики АЧХ для значений τ_2 : $2 \cdot 10^{-5}$ с, $4 \cdot 10^{-5}$ с, $8 \cdot 10^{-5}$ с, $16 \cdot 10^{-5}$ с, $32 \cdot 10^{-5}$ с, $64 \cdot 10^{-5}$ с и $128 \cdot 10^{-5}$ с (таблица 1). С увеличением τ_2 частотный диапазон по ускорению расширяется, и самым широким он будет у сейсмоприемника со значением $\tau_2 = 32 \cdot 10^{-5}$ с.

Рассмотрим ФЧХ сейсмоприемника ускорений. Сейсмоприемник с передаточной функцией (29) будет иметь формулу ФЧХ в виде:

$$j(\omega) = p + \arctg 2\omega\tau_2 + \arctg \omega\tau_2 - \arctg \frac{\omega}{X_1} - \arctg \frac{\omega}{X_2} - \arctg \frac{\omega}{X_3} - \arctg \frac{\omega}{X_4} \quad (32)$$

На рис. 16 изображены графики ФЧХ сейсмоприемника GS-32СТ и СТУ.

Полученные результаты проведенных теоретических исследований стали основанием для разработки электродинамического сейсмоприемника трехкомпонентных ускорений СТУ. Разработанный СТУ имеет параметры: частотный диапазон - от 3 до 250 Гц, динамический диапазон - 150 дБ (на частоте 10 Гц), коэффициент преобразования по ускорению - $0,1 \text{ В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-1}$, КНИ - 0,01%, предельный угол наклона - 90° , сопротивление обмотки катушки - 2200 Ом, масса преобразовательного блока - 160 г, масса сейсмоприемника - 850 г. Оси максимальной чувствительности преобразовательных блоков расположены по осям координат XYZ.

Проведенные полевые испытания подтвердили: разрешающая способность СТУ выше, чем у сейсмоприемника скорости.

Следует отметить два недостатка разработанного СТУ: большое сопротивление обмотки и небольшой коэффициент преобразования. Эти недостатки могут быть устранены увеличением габаритных размеров и массы преобразовательного блока сейсмоприемника.

Следует также подчеркнуть особенности разработанного СТУ.

Его полосовая АЧХ является характеристикой фильтра, согласованного со спектром сейсмического сигнала. Никакой другой известный сейсмоприемник, включая и пьезоэлектрический,

не имеет такой АЧХ.

Выбранная частота свободных колебаний механического колебательного звена 22 Гц позволила обеспечить в СТУ предельный угол наклона 90° , а вместе с действующей в преобразовательном блоке степенью затухания 3,7 дала бы возможность получить расчетный частотный диапазон от 3 (22/3,7/2) до 160 (22·2,3,7) Гц. Обнаруженный в сейсмоприемнике ускорений дефект, связан с изломом АЧХ, вызванным индуктивной связью между каркасом и обмоткой и определяемым постоянной времени τ_2 . Этот "дефект" превращен в "эффект" соответствующим выбором значения τ_2 , позволившем расширить частотный диапазон до 250 Гц.

Получение в сейсмоприемнике ускорений большой степени затухания заставило перераспределить объем воздушного зазора, оставив меньшую его долю для размещения обмотки, и длина паза для размещения обмотки в каркасе катушки стала меньше длины полюсного наконечника. С одной стороны это привело к нежелательному уменьшению коэффициента преобразования сейсмоприемника, а с другой позволило снизить его КНИ до 0,01%.

Максимальный сигнал на выходе СТУ зависит от частоты и будет наименьшим на нижней границе частотного диапазона и наибольшим на его верхней границе. Поэтому динамический диапазон, принимаемый как отношение максимального сигнала к создаваемому обмоткой СТУ тепловому шуму, имеющему постоянное значение, будет пропорционален максимальному сигналу. Так как ход катушки в преобразовательном блоке СТУ как и в электродинамическом сейсмоприемнике скорости равен 2 мм, то максимальное амплитудное значение перемещения корпуса, равное 1 мм на частоте 160 Гц, будет увеличиваться пропорционально снижению частоты и на частоте 10 Гц составит 16 мм. Расположенный вблизи сейсмического источника электродинамический сейсмоприемник скорости будет ограничивать сигналы с амплитудными перемещениями корпуса, превышающими 1 мм в рабочей полосе частот, а СТУ, расположенный там же, будет преобразовывать с нормированным КНИ сигналы с перемещениями, увеличенными на порядок.

Литература

1. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. М.: Недра. 1980.
2. Рыжов А.В. Новый электродинамический сейсмоприемник ускорений// Приборы и системы разведочной геофизики. - Саратов: Издательство Полиграф-Депо. 2002, № 2.
3. Рыжов А.В. Ответы на замечания к статьям по теории сейсмоприемников// Геофизика. М.: Издательство Герс. 2001, № 2.
4. Рыжов А.В. Теоретические исследования сейсмоприемников// Геофизика. М.: Издательство Герс. 1997, № 3.
5. Теория автоматического управления. Ч. 1. Под ред. Воронова А.А. М.: Высшая школа. 1977.
6. Теория и практика наземной неаварийной сейсморазведки, под ред. Шнейерсона М.Б., 1998: М., Недра.
7. Шведчиков Л.К. Теория электродинамического сейсмоприемника с учетом индуктивных связей между обмотками и проводящим каркасом подвижной катушки.// Прикладная геофизика. М.: Недра. 1979. Вып. 95.
8. Maxwell P., Tessman J., Reichert B., 2001, Design through to production of MEMS digital accelerometer for seismic acquisition: First break, volume 19.3.
9. Отчет ОМФ-12/92-93 ЦГЭ "Повышение эффективности работ МОГТ и ВСП", государственная регистрация № 1-92-18/7.

ИННОВАЦИИ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ