

В. А. ТОКМАКОВ, **А. А. ЖИГАЛЬЦЕВ**

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СЕЙСМОГРАФ ДЛЯ РАБОТЫ НА БОЛЬШИХ ЗАГРУБЛЕНИЯХ

Многоканальный сейсмограф представляет собой устройство, состоящее из одного сейсмоприемника и совокупности корректирующих цепей, включающих в себя гальванометры, способное регистрировать один или несколько кинематических элементов (смещения, скорости, ускорения) колебательного движения на различных уровнях увеличения. В существующих до настоящего времени многоканальных сейсмографах каждая регистрирующая цепь включалась на отдельную обмотку индукционной катушки сейсмоприемника [5]. В этом случае многообразие схемных решений требует множества конструктивных модификаций приборов. Предлагаемое устройство работает на типовом сейсмоприемнике, рабочая индукционная катушка которого замкнута на несколько последовательно соединенных сопротивлений (рис. 1). С этих сопротивлений снимается электрический сигнал и подается после прохождения через соответствующие корректирующие цепи на гальванометры. Имеющаяся в большинстве приборов вторая обмотка может быть использована для контроля чувствительности, включения пускового устройства и других целей.

Применяя различные типы сейсмоприемников и гальванометров, варьируя рабочие участки частотных характеристик, изменяя схемы соединения, можно получить записи различных кинематических элементов движения или запись одного элемента на разных уровнях увеличения.

В случае использования сейсмоприемника с большим периодом собственных колебаний T_s (по сравнению с регистрируемыми периодами T_m) возможна запись смещений и скоростей, если применен гальванометр с большим затуханием D_z или высокочастотный гальванометр соответственно. Запись ускорений обеспечивается высокочастотным сейсмоприемником и переусвоенным гальванометром [4, 7].

Теоретически n -канальный сейсмограф представляет собой колебательную систему с $n + 1$ степенями свободы. Уже для $n = 2$ все соотношения чрезвычайно громоздки [1, 2], их использование при ручном счете затруднительно. Дальнейшее увеличение числа каналов требует применения ЭВМ.

Самостоятельный интерес представляет работа многоканальных систем на больших загрузках, которые могут применяться в установках регистрации сильных движений, в инженерно сейсмологической службе и при технических измерениях. В этих случаях при расчете одного из каналов остальные сейсмические каналы могут быть заменены эквивалентными омическими сопротивлениями. Схема расчета любого канала на рис. 1 может быть представлена схемой одноканального

сейсмографа (рис. 2). Возможность замены каналов эквивалентными сопротивлениями была экспериментально подтверждена для двухканальной

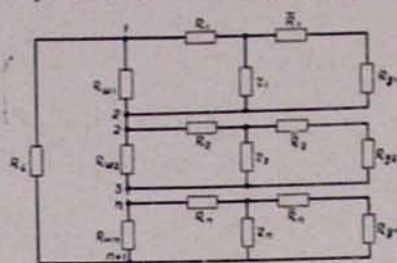


Рис. 1. Схема многоканального сейсмографа

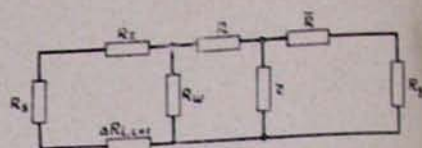


Рис. 2. Эквивалентная схема одного из каналов

ной установки, состоящей из сейсμοприемника С-5С и двух гальванометров ГВ-III-3. Увеличение каналов составляло 50 и 2. Коэффициенты связей сейсμοприемника с гальванометрами оценивались значениями $\sigma_{S, g1}^2 \sim 10^{-2}$, $\sigma_{S, g2}^2 \sim 10^{-5}$. Коэффициент взаимной связи гальванометров $\sigma_{g1, g2}^2 \sim 10^{-7}$.

Естественно, что при введении дополнительных каналов с большими заглублениями эти величины будут еще меньше, и предлагаемый способ замены каналов сопротивлениями не приведет к заметным искажениям частотных характеристик. Переход к большим увеличениям (большим связям) может сопровождаться появлением искажений.

Исследование допустимых границ увеличения связей в многоканальных сейсμοприемниках — специальный вопрос и здесь не рассматривается.

Коэффициент связи $\sigma_{S, g}^2$ сейсμοприемника и гальванометра для сложной схемы (рис. 2) может быть рассчитан, если произвести замену треугольника сопротивлений R_w, R, r на эквивалентное сопротивление звезды R_a, R_b, R_c :

$$R_a = \frac{R_w R}{R_w + R + r}; \quad R_b = \frac{R \cdot r}{R_w + R + r}; \quad (1)$$

$$R_c = \frac{R_w \cdot r}{R_w + R + r}.$$

После этой замены рассчитывается коэффициент связи по формуле:

$$\sigma_{S, g}^2 = \frac{R_c^2}{(R_s + R_z + \Delta R_{1, i+1} + R_a + R_c)(R_g + R + R_c)}. \quad (2)$$

Для расчета связи между двумя гальванометрами замену по формулам (1) необходимо проделать трижды и только потом рассчитать величину $\sigma_{g1, g2}^2$.

Сейсмограф с гальванометрической регистрацией, записывающий один из кинематических элементов колебательного движения, скажем, скорость (смещение, ускорение), можно рассматривать как систему, на вход которой подается скорость $\dot{x}(t)$ (смещение $\bar{x}(t)$, ускорение $\ddot{x}(t)$). На выходе сейсмографа рассматривается величина $y(t)$ — отклонение светового пятна от положения равновесия.

Между входной и выходной величинами для установившихся процессов существует следующая функциональная зависимость:

$$\begin{aligned}\bar{y}(t) &= \bar{V}_x(T_\omega) \bar{x}(t) & \text{— для скорости,} \\ \bar{y}(t) &= \bar{V}_x(T_\omega) \bar{x}(t) & \text{— для смещения,} \\ \bar{y}(t) &= \bar{V}_x(T_\omega) \bar{x}(t) & \text{— для ускорения.}\end{aligned}\quad (3)$$

Все величины можно рассматривать как комплексные, то есть имеющие амплитуду и фазу. Функция $\bar{V}(T_\omega)$ — здесь комплексное увеличение системы, включающее в себя амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики. Ниже будет рассматриваться только первая для случая, когда реакцией гальванометра на маятник можно пренебречь (связь $\sigma_{s, g}^2$ стремится к нулю). Для амплитуд соотношения (3) можно написать в виде

$$y(t) = V_x^{(m)}(T_\omega) x^{(m)}(t), \quad (4)$$

где $m=1, 0, 2$ — показатель порядка производной для скоростей, смещений и ускорений.

Увеличение $V(T_\omega)$ можно представить в виде произведения масштабного коэффициента на относительную (приведенную к единице) частотную характеристику канала:

$$V_x^{(m)}(T_\omega) = V_{ox}^{(m)} U_x^{(m)}(T_\omega). \quad (5)$$

Частотные характеристики определяются периодами и затуханиями составляющих сейсмического канала и выражаются следующими формулами [4, 7]:

$$\begin{aligned}U_x(T_\omega) &= U_s u_g^2 U_g & \text{— для скорости,} \\ U_x(T_\omega) &= U_s 2D_g u_g U_g & \text{— для смещений,} \\ U_x(T_\omega) &= u_s^2 U_s 2D_g u_g U_g & \text{— для ускорений.}\end{aligned}\quad (6)$$

В этих соотношениях величины $u_s = \frac{T_\omega}{T_s}$ и $u_g = \frac{T_\omega}{T_g}$ — периоды ре-

гистрируемых колебаний, отнесенные к периодам собственных колебаний, D_s и D_g — затухания сейсмоприемника и гальванометра, функция U_s имеет вид:

$$U_s = \frac{1}{\sqrt{(1 - u_s^2)^2 + 4D_s^2 U_s^2}}. \quad (7)$$

Функция u_g аналогична и отличается индексом g у всех элементов.

Выражения для масштабов определяются значениями чувствительностей сейсмоприемника и гальванометра, их собственными периодами и затуханиями, а также суммарным сопротивлением электрической цепи.

Для схемы прямого соединения (последовательное включение сейсмоприемника и гальванометра) выражения для масштабов можно написать в виде [7]:

$$\begin{aligned}V_{0x} &= \frac{S_s S_g}{R_s + R_g} [\text{сек}] & \text{— для скорости,} \\ V_{0x} &= \frac{\pi}{D_g T_g} \cdot \frac{S_s S_g}{R_s + R_g} & \text{— для смещения,}\end{aligned}\quad (8)$$

$$V_{0\dot{x}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{T_s^2}{D_g T_g} \cdot \frac{S_s S_g}{R_s + R_g} [\text{сек}^2] \quad - \text{ для ускорения.}$$

Здесь $S_s = \left| \frac{b}{M/\text{сек}} \right|$ — чувствительность сейсмоприемника, $S_g \left[\frac{M}{a} \right]$ —

чувствительность гальванометра на оптическом рычаге регистратора, R_s и R_g — внутренние сопротивления сейсмоприемника и гальванометра.

Если соединение не прямое, а сложное, то любую электрическую схему можно по законам электротехники заменить схемой прямого соединения. При этом сейсмоприемник можно рассматривать как источник электродвижущей силы, а гальванометр — как омическую нагрузку, обладающую свойством реагировать на проходящий через нее ток. Пользуясь, например, методом контурных токов, можно показать, что введение Г-образного шунта (рис. 2) из сопротивлений R_z и R_w равнозначно замене сейсмоприемника на другой, с измененными чувствительностью $S_{s\beta}$ и внутренним сопротивлением $R_{s\beta}$.

При этом чувствительность уменьшается в β_s раз

$$S_{s\beta} = \frac{S_s}{\beta_s} \quad (9)$$

а заглубление β_s выражается как функция двух сопротивлений вводимого шунта

$$\beta_s(R_z, R_w) = \frac{R_s + R_z + R_w}{R_w} \quad (10)$$

Внутреннее сопротивление заглубленного сейсмоприемника равно эквивалентному:

$$R_{s\beta} = \frac{R_w(R_s + R_z)}{R_w + R_s + R_z} \quad (11)$$

Можно также показать, что введение шунта к гальванометру из сопротивлений $\bar{R}$ и r (рис. 2) равнозначно замене его на другой с чувствительностью

$$S_{g\beta} = \frac{S_g}{\beta_g} \quad (12)$$

где

$$\beta_g(\bar{R}, r) = \frac{R_g + \bar{R} + r}{r} \quad (13)$$

и эквивалентным внутренним сопротивлением

$$R_{g\beta} = \frac{r(R_g + \bar{R})}{r + R_g + \bar{R}} \quad (14)$$

Масштаб записи по скорости после введения сложного шунта $R_z, R_w, R, r, \bar{R}$ выразится формулой

$$V_{0\dot{x}\beta} = \frac{S_{s\beta} \cdot S_{g\beta}}{\sum_i R_{i\beta}} \quad (15)$$

где $\sum R_{i3} = R_{s3} + R + R_{g3}$ — суммарное сопротивление цепи из новых элементов, включающее сопротивление отвязки R . Общее заглубление можно получить, разделив максимальный масштаб (8) на заглубленный (15):

$$\beta = \beta_s \beta_g \frac{\sum R_{i3}}{R_{s3} + R_g} \quad (16)$$

При регистрации смещений и ускорений оказывается более удобным чувствительность гальванометра оставлять неизменной, а всю заглубляющую цепь относить к сейсмоприемнику. При этом заглубление можно производить в одну, две или большее количество ступеней. Например, для рис. 2 всю заглубляющую цепь можно представить двумя ступенями заглубления:

$$\beta = \beta_s \beta'_s \quad (17)$$

где β_s определяется формулой (10), а вторая ступень является функцией шунта R и r :

$$\beta'_s = \frac{R_{s3} + R + r}{r} \quad (18)$$

Общее эквивалентное сопротивление равно измеренному на сопротивлении r :

$$R'_{s3} = \frac{r(R + R_{s3})}{r + R + R_{s3}} \quad (19)$$

Масштаб записи по смещению после введения сложного шунта R_s , R_w , R , r выразится формулой:

$$V_{ок3} = \frac{\pi}{T_g D_g} \cdot \frac{S_s S_g}{\beta (R'_{s3} + \bar{R} + R_g)} \quad (20)$$

Затухание гальванометра D_g можно представить в виде:

$$D_g = D_{ог} + \frac{a_g}{R_g + R_{внг}} \quad (21)$$

где $D_{ог}$ — воздушное (масляное или какое-то постороннее) затухание; $R_{внг}$ — сопротивление, являющееся внешним для гальванометра; a_g — постоянная затухания гальванометра.

Для большинства гальванометров, применяемых в сейсмометрии, можно принять $D_{ог} = 0^*$. Ошибка при этом допущении незначительна. Так, для гальванометра ГБ-III-3 величина $D_{ог}$ в среднем равна 0,005, а применяемое в схемах записи смещений $D_g = 20$. При отбрасывании $D_{ог}$ получается ошибка

$$\frac{\Delta D_g}{D_g} = \frac{0,005}{20} 100 = 0,025\%.$$

Для рис. 2 величина внешнего сопротивления равна

* $D_{ог}$ не равно нулю, например, для гальванометров М002, входящих в комплект К001 (Кишиневский завод «Виброприбор») и шлейфов Н-135 (Ленинградский завод «Вибратор»).

$$R_{\text{огз}} = \bar{R} + R_s.$$

Поэтому

$$D_g = \frac{a_g}{R_g + \bar{R} + R_s}.$$

Подставляя это значение в соотношение (20), получаем выражение

$$V_{\text{огз}} = \frac{\pi}{T_g a_g} \cdot \frac{S_s S_g}{\beta}. \quad (22)$$

Аналогично можно получить выражение для масштаба по ускорению

$$V_{\text{огз}} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{T_s^2}{T_g a_g} \cdot \frac{S_s S_g}{\beta} [\text{сек}^2]. \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) видно, что сопротивление $\bar{R}$, включенное последовательно гальванометру, не влияет на масштаб записи в случае регистрации смещений и ускорений. Объясняется это тем, что произведение $D_g(R_g + R_{\text{огз}})$, входящее в формулу (21), при изменении величин $\bar{R}$ и D_g остается неизменным. Оговоримся еще раз, что только для гальванометров класса $D_{\text{ог}} = 0$. Это можно показать, также рассматривая обычно применяемую в сейсмометрии формулу

$$V_{\text{огз}} = \frac{2A}{I_0} \sqrt{\frac{k_s}{k_g} \cdot \frac{T_g}{T_s}} \cdot \sqrt{\frac{D_s}{D_g} \sigma^2}.$$

При изменении величины $\bar{R}$ изменяются величины D_s , D_g и σ^2 , но таким образом, что комплекс $\frac{D_s}{D_g} \sigma^2$ остается неизменным.

Схема сейсмографа с регистрацией на нескольких уровнях увеличения приведена на рис. 1. R_s здесь рабочая индукционная катушка сейсмоприемника, замкнутая на последовательно соединенные сопротивления R_{wi} ($i=1, 2, 3, \dots n$ по числу каналов), сопротивления R_i , r_i , R_i представляют собой корректирующие цепи гальванометров.

Затухание сейсмоприемника определяется суммой входных сопротивлений регистрирующих цепей, определяемых на клеммах i , $i+1$. Входное сопротивление одного i -го канала определяется формулой:

$$R_{i,i+1} = \frac{R_{wi}(R_i + R_{g^{i+1}})}{R_{wi} + R_i + R_{g^{i+1}}}. \quad (24)$$

Сумма этих сопротивлений

$$R_{1,n+1} = \sum_{i=1}^n R_{i,i+1} \quad (25)$$

определяется затуханием сейсмоприемника:

$$R_{1,n+1} = \frac{a_s T_s}{D_s - D_{\text{ос}}} - R_s, \quad (26)$$

где $D_{\text{ос}}$ — воздушное затухание сейсмоприемника;

$a_s \left[\frac{\text{ом}}{\text{сек}} \right]$ — постоянная затухания маятника, приведенная к периоду

$T_s = 1 \text{ сек.}$

Величина D_{05} в случае работы с двухкатушечным прибором включает в себя, кроме воздушного затухания, также и затухание, вносимое второй катушкой.

Каждый сейсмический канал может характеризоваться максимальным увеличением в схеме прямого соединения по формулам (8). С другой стороны, канал характеризуется своим коэффициентом заглубления

$$\beta_i = \frac{V_{oi}}{V_{oi\beta}}, \quad (27)$$

где $V_{oi\beta}$ — необходимое увеличение сейсмического канала.

Естественно задать величины входных сопротивлений обратно пропорциональными заглублениям каналов с тем, чтобы их корректирующие сопротивления были соизмеримыми. Принимая это условие, получаем систему уравнений:

$$R_{1,2} : R_{2,3} : \dots : R_{n,n+1} = \frac{1}{\beta_1} : \frac{1}{\beta_2} : \dots : \frac{1}{\beta_n}. \quad (28)$$

Введем обозначение:

$$\alpha_i = \frac{R_{1,2}}{R_{1,i+1}} = \frac{\beta_i}{\beta_1} \quad (29)$$

($\alpha_1 = 1$; $i = 1, 2, \dots, n$) и решая совместно уравнения (25), (28) и (29), получаем выражение для расчета входных сопротивлений:

$$R_{1,i+1} = \frac{R_{1,n+1}}{\alpha_i \sum_{j=1}^n \frac{1}{\alpha_j}}. \quad (30)$$

При расчете корректирующих цепей каждого i -го канала применяется схема рис. 2. Здесь сопротивление $R_{\Sigma i}$ представляет собой сумму входных сопротивлений всех остальных каналов, кроме рассматриваемого:

$$R_{\Sigma i} = R_{1,n+1} - R_{1,i+1}. \quad (31)$$

В схеме рис. 2 величины R_s , R_{gi} и $R_{\Sigma i}$ известны. Величину r_i можно задать уравнением

$$r_i = \frac{a_{gi}}{D_{gi}} - R_{gi}. \quad (32)$$

Остаются неизвестными величины R_{wi} , R_i и $\bar{R}_i$. Их значения однозначно определяются тремя уравнениями, определяющими затухание сейсμοприемника, затухание гальванометра и заглубление данного канала. Эти уравнения даются формулами (24), (21), а также (16) для скорости и (17) для смещения и ускорения.

Искомые величины R_{wi} , R_i и $\bar{R}_i$ однозначно определяются системой этих уравнений. Решение системы приводит к решению кубических или квадратных алгебраических уравнений. Точное решение достаточно сложно и громоздко, процесс расчета трудоемок. Имеет смысл поэтому применять приближенные и гораздо более простые методы расчета. Упрощающие предположения удобнее делать различными в зависимости от схемы регистрации. При этом все результирующие параметры схемы

могут быть точно рассчитаны. Их отклонения от параметров, заданных при больших заглублениях, не будут выходить за пределы первых процентов (кроме величины D_g при расчете скоростных каналов).

При расчете любого канала применяются схема и формулы для одноканального сейсмографа, поэтому ниже индекс i , где он не требуется особо, будет опускаться.

РАСЧЕТ СЕЙСМИЧЕСКОГО КАНАЛА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СКОРОСТЕЙ

Характеристика канала полностью определяется масштабом записи и величинами T_s , D_s , T_g , D_g . В случае регистрации скоростей для характеристик, имеющих столбобразный участок, длиннопериодный склон характеристики определяется параметрами T_s и D_s , а короткопериодный — T_g и D_g . Так как при регистрации скоростей работают обычно с гальванометром, период которого намного меньше регистрируемых периодов колебаний, то выдерживать параметр D_g можно в достаточно широких пределах (0.7—1). Поэтому нужный режим работы гальванометра может обеспечиваться одним сопротивлением r и, следовательно, сопротивление R можно убрать ($\bar{R} = 0$). Сопротивление r задается уравнением (32), причем величина D_g здесь определяется нижним значением в допустимых пределах. Проводимость участка схемы влево от сопротивления r несколько увеличивает затухание D_g , оставляя его в заданных пределах.

Неизвестными сопротивлениями в схеме остаются R_w и R . Они определяются из решения системы уравнений (24) и (16):

$$R_w = \frac{R_{1,i+1}}{1 - \frac{\beta_g}{\beta} \cdot \frac{(R_s + R_{1,n+1})}{(R_s + R_g)}}, \quad (33)$$

$$R_1 = \frac{R_{1,i+1}}{\frac{\beta_g}{\beta} \cdot \frac{(R_s + R_{1,n+1})}{(R_s + R_g)}} - R_g. \quad (34)$$

В результате расчета получают заданные значения масштаба и сопротивления $R_{1,i+1}$. Если все каналы скоростные, то и сопротивление $R_{1,n+1}$ также равно заданному. Отсюда и D_s равно заданному. Затухание D_g отклоняется от значения, заданного формулой (32). Это отклонение определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \Delta D_g &= D_g(\xi - 1), \\ \xi &= \frac{R_{s1} + R + r}{R_{s1} + R + R_{g1}}. \end{aligned} \quad (35)$$

Из этих формул следует, что при большом сопротивлении отвязки R величина ξ стремится к единице, а отклонение ΔD_g — к нулю.

РАСЧЕТ СЕЙСМИЧЕСКОГО КАНАЛА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СМЕЩЕНИЙ И УСКОРЕНИЙ

Отличие частотной характеристики в этом случае от скоростной состоит в том, что длиннопериодный ее склон для смещений и короткопериодный — для ускорений определяется всеми четырьмя параметрами T_s , D_s , T_g , D_g . Поскольку все каналы включены на один сейсмоприемник, различие их частотных характеристик целиком определяется

расхождением параметров T_g и D_g . При этом различие произведений $T_g D_g$ вызовет различие в длиннопериодной части частотной характеристики, а различие отношений $\frac{T_g}{D_g}$ — в области короткопериодного края. Так как при регистрации сильных движений используются относительно короткопериодные гальванометры, имеющие большое затухание, отношение $\frac{T_g}{D_g}$ достаточно мало, и короткопериодный край

выходит обычно за пределы, интересующие исследователей. Поэтому для обеспечения идентичности частотных характеристик важно сохранить равенство произведений $T_g D_g$ для всех каналов, регистрирующих одну функцию. Следовательно, параметр D_g для каждого канала должен быть близок к заданной величине, зависящей от периода T_g данного канала. Пренебрегать в этом случае сопротивлением $\bar{R}$ нельзя. В схеме канала остаются три неизвестные величины R_w , R и R при условии, что значение r задается уравнением (32). Сопротивление r обеспечивало бы нужное затухание D_g , если бы оно было внешним для гальванометра. Но кроме него во внешней для гальванометра цепи имеется система сопротивлений R_s , R_z , R_w , R , которая увеличивает проводимость внешней цепи, и сопротивление $\bar{R}$, которое эту проводимость уменьшает. Одно можно скомпенсировать другим, оставив величину D_g заданной. Если каким-либо способом найдены величины R_w и R , то можно найти величину $R_{g\beta}$ (19) и далее величину компенсирующего сопротивления $\bar{R}$:

$$\bar{R} = r - R_{g\beta}. \quad (36)$$

Задача, следовательно, заключается в том, чтобы найти сопротивления R_w и R . Рассмотрение возможностей показало, что получить сравнительно простые выражения для этих величин можно, если при составлении уравнения (24) отбросить плечо $\bar{R}$, R_g . Тогда уравнение (24) запишется:

$$R_{1,i+1} = \frac{R_w(R+r)}{R_w + R + r}. \quad (24')$$

Решая систему уравнений (24') и (17), находим:

$$R_w = \frac{R_{1,i+1}}{1 - \frac{R_s + R_{1,n+1}}{\beta \cdot r}}, \quad (37)$$

$$R = \frac{R_{1,i+1}}{\frac{R_s + R_{1,n+1}}{\beta \cdot r} - r}. \quad (38)$$

Величины $\bar{R}$ и R_g на масштаб не влияют, поэтому при рассматриваемом подходе параметры $V_{ox\beta}$ или $V_{ox\beta}$ (так же как и D_g) получают заданными, а D_s — приближенным. Объясняется это тем, что в целях упрощения расчетов мы сознательно пошли на изменение входного сопротивления канала $R_{1,i+1}$. Это изменение можно найти, сопоставляя формулы (24) и (24'):

$$\Delta R_{1,i+1} = \frac{(r - R_{g\beta})}{\left(\frac{R+r}{R_w} + 1\right) \left(\frac{R + R_{g\beta}}{R_w} + 1\right)}. \quad (39)$$

Введение в схему последующих каналов также изменяет внешнее для сейсмоприемника сопротивление $R_{i,i}$, заложенное в расчет данного канала. Поэтому введение новых каналов приведет к накоплению отклонений параметров для всех предыдущих каналов. Для компенсации изменения внешнего сопротивления введем в цепь последовательно сейсмоприемнику R_i добавку $\Delta R_{i,i+1}$ такую, чтобы

$$R_{i,i+1} \text{ заданное} = R_{i,i+1} \text{ истинное} + \Delta R_{i,i+1}. \quad (40)$$

Внешнее для сейсмоприемника сопротивление $R_{i,n+1}$ останется при этом заданным, а следовательно, сохранится заданным и значение D_g . Поправка $\Delta R_{i,i+1}$ влияет на параметры только своего канала. При расчете нескольких каналов вводится суммарная поправка:

$$\Delta R_{i,n+1} = \sum_{i=1}^n \Delta R_{i,i+1}, \quad (41)$$

причем на параметры V_{ox} или V_{ox}^* и D_g любого канала влияет не вся сумма, а только своя часть общей поправки $\Delta R_{i,i+1}$. Заглубление любого канала будет отличаться от заданного в соответствии с формулой

$$\beta_{\text{ист}} = \beta \left(1 + \frac{\Delta R_{i,i+1}}{\beta_s R_w} \right) \left(1 + \frac{R_{s3}}{\beta_s \cdot r} \right). \quad (42)$$

Входящая в выражение (42) поправка ΔR_{s3} есть изменение величины R_{s3} :

$$\Delta R_{s3} = R_{s3} (A - 1), \quad (43)$$

где

$$A = \frac{1 + \frac{\Delta R_{i,i+1}}{R_s + R_i}}{1 + \frac{\Delta R_{i,i+1}}{\beta_s R_w}}.$$

Изменение эквивалентного сопротивления R_{s3} ведет к изменению значения D_g на величину:

$$\Delta D_g = D_g \left(\frac{B - 1}{\frac{R_g + \bar{R}}{R_{s3}^2} + B} \right), \quad (44)$$

где

$$B = \frac{1 + \frac{\Delta R_{s3}}{R + R_{s3}}}{1 + \frac{\Delta R_{s3}}{r + R + R_{s3}}}.$$

Из структуры формул видно, что при больших заглублениях отклонения от заданных величин невелики как в заглублении β , так и в затухании D_g . Это будет показано ниже на рассматриваемом примере. Подчеркнем еще раз, что поправки $\Delta R_{i,i+1}$ вводятся только при расчете каналов по смещению и ускорению. Для скоростного канала $\Delta R_{i,i+1} = 0$, поскольку принятая методика расчета обеспечивает величину входного сопротивления $R_{i,i+1}$, в этом случае заданного.

Предполагается, что многоканальный сейсмограф будет применен организуемой в настоящее время сейсмометрической службой крупных городов и строек в сейсмических районах СССР. Возможны несколько вариантов его использования:

- а) запись смещений на двух и трех уровнях увеличения;
- б) запись скоростей на двух-трех уровнях;
- в) запись смещений и скоростей совместно на двух-трех-четыре уровнях.

Намечаемая аппаратура: сейсмоприемники С-5С [6], гальванометры ГБ-III-3 и ГБ-IV-B-3, входящие в комплект осциллографов Н-700 или ИСО-2 [3]. Назначение установки—запись сильных и разрушительных землетрясений. Предполагаемые увеличения $V_{ox3} = 50$ и 2 по смещению и $V_{ox3} = 4$ и 0,16 [сек] (или 8 и 0,5) по скорости. Для примера рассмотрим расчет наиболее сложной схемы четырехканального сейсмографа с приведенными выше увеличениями.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНОГО СЕЙСМОГРАФА

Параметры сейсмоприемника С-5-С: $R_s = 91 \text{ ом}$; $S_s = 13 \frac{\text{в}}{\text{м/сек}}$,
 $a_s = 35 \text{ ом/сек}$, $D_{os} = 0,02$.

Параметры гальванометров:

№ канала	R_g , ом	T_g , сек	S_g , м/а	A_g , ом
1	135	0,2	14000	5635
2	135	0,18	14000	5535
3	52	1/120	1800	152
4	52	1/120	1800	152

Из вышеприведенных элементов требуется составить схему четырехканального сейсмографа с параметрами: $T_s = 5 \text{ сек}$, $D_s = 0,7$

$V_{ox31} = 50$ } Запись смещений

$V_{ox32} = 2$ } D_{g1} и D_{g2} определяются в процессе расчета

$V_{ox33} = 4 \text{ [сек]}$ } запись скоростей

$V_{ox34} = 0,16 \text{ [сек]}$ } D_{g3} и D_{g4} в интервале 0,7—1.

Схема сейсмографа приведена на рис. 3.

План расчета можно представить рядом:
 для смещений

$$V_{ox} - \beta - \alpha - R_{1,5} - R_{1,i+1} - r - R_s - R_w - R - R_{s3} - R_{s3}' - \bar{R} - \\ - \Delta R_{1,i+1} - \beta_s - \beta_s' - \Delta R_{s3} - \beta_{ист} - \Delta D_g,$$

для скорости

$$V_{ox} - \beta - \alpha - R_{1,5} - R_{1,i+1} - r - R_s - \beta_g - R_{g3} - R_w - R - R_{s3} - \Delta D_g.$$

Расчет производился на счетной машине с точностью 7—8 знаков, из которых мы чисто формально оставляем 5 для того, чтобы точнее пока-

$$R_{1,2} \text{ истинное} = \frac{178,79 \cdot 424,50}{603,29} = 125,80 \text{ ом},$$

$R_{1,2} \text{ заданное} = R_{1,2} \text{ ист} + \Delta R_{1,2} = 125,80 + 2,8227 = 128,62 \text{ ом}$, что совпадает со значением, полученным в пункте 5 общего расчета.

7) Загрубления β_s и β_s^1 (10 и 18):

$$\beta_s = \frac{92 + 37,73 + 178,79}{178,79} = 1,72;$$

$$\beta_s^1 = \frac{74,841 + 368,05 + 90,4}{90,4} = 5,8992.$$

8) Поправка на эквивалентное сопротивление сейсмоприемника ΔR_{s3} (43):

$$\Delta R_{s3} = R_{s3} (A - 1);$$

$$A = \frac{1 + \frac{2,8227}{91 + 37,73}}{1 + \frac{2,8227}{1,72 \cdot 178,79}} = 1,0126;$$

$$\Delta R_{s3} = 74,841 \cdot 0,0126 = 0,94544 \text{ ом}.$$

9) Истинное загрубление $\beta_{\text{ист}}$ (42):

$$\begin{aligned} \beta_{\text{ист}} &= 10,148 \left(1 + \frac{2,8227}{1,72 \cdot 178,79} \right) \left(1 + \frac{0,94544}{5,8992 \cdot 90,4} \right) = \\ &= 10,148 \cdot 1,0092 \cdot 1,0018 = 10,260. \end{aligned}$$

10) Поправка на затухание гальванометра ΔD_{g1} (44):

$$B = \frac{1 + \frac{0,94544}{368,05 + 74,841}}{1 + \frac{0,94544}{368,05 + 74,841 + 90,4}} = 1,0004;$$

$$\Delta D_{g1} = 25 \frac{0,0004}{2,0023 + 1,0004} = 0,003.$$

Расчет 2-го канала,

Для выполнения условия $D_{g2} T_{g2} = 5$ при $T_{g2} = 0,18 \text{ сек}$ необходимо $D_{g2} = 27,778$.

Ниже приводим лишь результаты расчета.

$$r_2 = 64,26 \text{ ом};$$

$$R_{\Sigma 2} = 161,80 \text{ ом};$$

$$R_{w2} = 4,6127 \text{ ом};$$

$$R_2 = 261,63 \text{ ом};$$

$$R_{s3} = 4,5301 \text{ ом};$$

$$R_{s3}^1 = 51,763 \text{ ом};$$

$$\bar{R}_2 = 12,497 \text{ ом};$$

$$\Delta R_{2,3} = 0,004 \text{ ом}.$$

$\Delta R_{s3} = 0$. Поскольку поправки $\Delta R_{2,3}$ и ΔR_{s3} равны практически нулю, то загрубления β_2 и затухание D_{g2} равны расчетным.

Расчет 3-го канала.

$$1) r_3 = \frac{152}{0,7} - 52 = 165,14 \text{ ом};$$

затянуть отклонение расчетных величин от заданных. В скобках приводится номер формулы, по которой производится расчет.

Расчет общей части.

1) Максимальные масштабы (22 и 8):

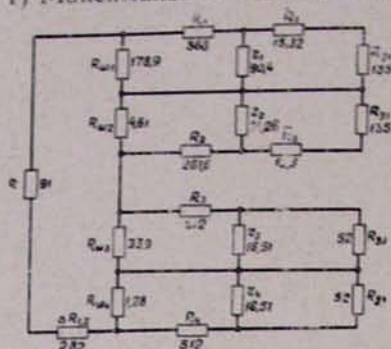


Рис. 3. Схема четырехканального сейсмографа для регистрации смещений и скоростей на двух уровнях

$$V_{ox1} = \frac{\pi \cdot S_s \cdot S_g}{a_g T_g} = \frac{3,1416 \cdot 13 \cdot 1,4 \cdot 10^4}{0,2 \cdot 5635} = 507,34;$$

$$V_{ox2} = \frac{3,1416 \cdot 13 \cdot 1,4 \cdot 10^4}{0,18 \cdot 5535} = 573,89;$$

$$V_{ox3} = \frac{S_s \cdot S_g}{R_s + R_g} = \frac{13 \cdot 1,8 \cdot 10^3}{91 + 52} = 163,64 \text{ [сек]};$$

$$V_{ox4} = 163,64 \text{ [сек]}.$$

2) Необходимые закругления (27):

$$\beta_1 = \frac{V_{ox1}}{V_{ox1}^2} = \frac{507,34}{50} = 10,148;$$

$$\beta_2 = \frac{573,89}{2} = 286,95;$$

$$\beta_3 = \frac{V_{ox3}}{V_{ox3}^2} = \frac{163,64}{4} = 40,910;$$

$$\beta_4 = \frac{163,64}{0,16} = 1022,7.$$

3) Относительные закругления (29):

$$\alpha_1 = 1; \quad \alpha_2 = \frac{286,95}{10,148} = 28,280;$$

$$\alpha_3 = \frac{40,91}{10,148} = 4,0317; \quad \alpha_4 = \frac{1022,7}{10,148} = 100,79.$$

4) Внешнее для сейсмоприемника сопротивление (26):

$$R_{1,5} = \frac{a_s T_s}{D_s - D_{os}} - R_s = \frac{35,5}{0,68} - 91 = 166,35 \text{ ом}.$$

5) Входные сопротивления каналов (30):

$$R_{1,2} = \frac{R_{1,5}}{\alpha_1 \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{1}{\alpha_4} \right)} = \frac{166,35}{1,2933} = 128,62 \text{ ом};$$

$$R_{2,3} = \frac{166,35}{28,28 \cdot 1,2933} = 4,54483 \text{ ом};$$

$$R_{3,4} = \frac{166,35}{4,0317 \cdot 1,2933} = 31,903 \text{ ом};$$

$$R_{4,5} = \frac{166,35}{100,79 \cdot 1,2933} = 1,2761 \text{ ом};$$

$$\text{Проверка: } R_{1,5} = \sum_1^4 R_{1,i+1} = 128,62 + 4,5483 + 31,903 + 1,2761 = 166,35 \text{ ом}.$$

Расчет 1-го канала:

Если позволяют параметры гальванометра, желательно придерживаться соотношения $D_g T_g = T_s$. Для 1-го и 2-го каналов это равенство можно выполнить. Отсюда $D_{g1} 0,2 = 5$: $D_{g1} = 25$.

1) Шунтирующее гальванометр сопротивление (32):

$$r_1 = \frac{a_{g1}}{D_{g1}} - R_{g1} = \frac{5635}{25} - 135 = 90,4 \text{ ом}.$$

2) Сопротивление $R_{\Sigma 1}$ (31):

$$R_{\Sigma 1} = R_{1,5} - R_{1,2} = 166,35 - 128,62 = 37,73 \text{ ом}.$$

3) R_{w1} и R_1 (37 и 38):

$$R_{w1} = \frac{R_{1,2}}{1 - \frac{R_s + R_{1,5}}{\beta_1 r_1}} = \frac{128,62}{1 - \frac{91 + 166,35}{10,148 \cdot 90,4}} = 178,79 \text{ ом};$$

$$R_1 = \frac{R_{1,2}}{\frac{R_s + R_{1,5}}{\beta_1 r_1}} - r_1 = \frac{128,62}{0,28056} - 90,4 = 368,05 \text{ ом}.$$

4) Первое и второе эквивалентное сопротивление сейсмоприемника (11 и 19):

$$R_{s3} = \frac{178,79 \cdot 128,73}{307,51} = 74,841 \text{ ом};$$

$$R'_{s3} = \frac{90,4 \cdot 442,89}{533,29} = 45,076 \text{ ом}.$$

5) Компенсирующее сопротивление $\bar{R}$ (36):

$$\bar{R}_1 = r_1 - R'_{s3} = 90,4 - 45,076 = 45,324 \text{ ом}.$$

6) Компенсирующая добавка $\Delta R_{1,2}$ (39) и R_{g3} (14):

$$R_{g3} = \frac{90,4 \cdot 150,32}{240,72} = 56,452 \text{ ом};$$

$$\Delta R_{1,2} = \frac{90,4 \cdot 56,452}{3,5642 \cdot 3,3744} = 2,8227 \text{ ом}.$$

Здесь можно сделать проверку по формуле (40), рассчитав предварительно $R_{1,2}$ истинное по (24).

$$2) R_{\Sigma 3} = 166,35 - 31,903 = 134,45 \text{ ом};$$

$$3) \beta_{g3} = \frac{52 + 165,14}{165,14} = 1,3149;$$

$$4) R_{g3} = \frac{165,14 \cdot 52}{217,14} = 39,547 \text{ ом};$$

$$5) R_{w3} = \frac{31,903}{1 - \frac{1,3149 \cdot 257,35}{40,909 \cdot 143}} = 33,863 \text{ ом};$$

$$6) R_3 = \frac{31,903}{0,057844} - 39,547 = 511,99 \text{ ом};$$

$$7) R_{s3} = \frac{33,863 (91 + 134,45)}{259,31} = 29,441 \text{ ом};$$

$$8) \xi = \frac{29,441 + 511,99 + 165,14}{29,441 + 511,99 + 39,547} = 1,2162;$$

$$\Delta D_{g3} = 0,7 \cdot 0,2162 = 0,1513.$$

Расчет 4-го канала.

$$1) r_4 = 165,14 \text{ ом};$$

$$2) R_{\Sigma 4} = 166,35 - 1,2761 = 165,08 \text{ ом};$$

$$3) \beta_{g4} = 1,3149;$$

$$4) R_{g4} = 39,547 \text{ ом};$$

$$5) R_{w4} = \frac{1,2761}{1 - \frac{1,3149 \cdot 257,35}{1022,7 \cdot 143}} = \frac{1,2761}{1 - 0,0023173} = 1,2791 \text{ ом};$$

$$6) R_4 = \frac{1,2761 - R_{g4}}{0,0023137} = 551,54 - 39,547 = 511,99 \text{ ом};$$

$$7) R_{s4} = \frac{1,2791 \cdot 256,08}{257,36} = 1,2727 \text{ ом};$$

$$8) \xi = \frac{1,2727 + 551,54 + 165,14}{1,2727 + 551,54 + 39,547} = 1,2120.,$$

$$\Delta D_{g4} = 0,7 \cdot 0,212 = 0,1484.$$

Результаты расчета всех четырех каналов сведены в табл. 1, из которой видно, что отклонения параметров, рассчитанных приближенным методом, от заданных незначительны. По сути дела такими отклонениями можно пренебречь. Отклонение D_g для скоростных каналов в процентном отношении велико, но остается в заданных пределах (0,7—1).

Оценим величину связей.

Преобразуя треугольник R_{w1} , R_1 , r_1 в звезду R_a , R_b , R_c , для 1-го канала получаем (1):

$$R_a = \frac{178,8 \cdot 368,1}{637,3} = 104,8 \text{ ом};$$

Параметр	чем обеспечи- вается	1-й канал			2-й канал			3-й канал			4-й канал		
		задано	получено	отклоне- ние, %	задано	получено	отклоне- ние, %	задано	получено	отклоне- ние, %	задано	получено	отклоне- ние, %
V_0	Схемой соеди- нения	50	49,46	1,1	2	2	0	4	4	0	0,16	0,16	0
$T_{\text{св}}$	Устанавли- вается	5	—	—	5	—	—	5	—	—	5	—	—
$T_{\text{г}},$ $T_{\text{св}}$	Берется та- ким, ка- кой есть	0,2	—	—	0,18	—	—	1/120	—	—	1/120	—	—
$D_{\text{с}}$	Схемой	0,7	0,7	0	0,7	0,7	0	0,7	0,7	0	0,7	0,7	0
$D_{\text{г}}$	Схемой	25	24,997	0	27,77	27,77	0	0,7	0,851	22	0,7	0,848	21

$$R_b = \frac{368,1 \cdot 90,4}{637,3} = 52,22 \text{ ом};$$

$$R_c = \frac{178,8 \cdot 90,4}{637,3} = 25,35 \text{ ом}.$$

Связь рассчитывается по формуле (2):

$$\sigma_{\text{сг1}}^2 = \frac{(25,35)^2}{(91 + 37,73 + 2,82 + 104,8 + 25,35)(135 + 15,32 + 52,22 + 25,35)} = 1,08 \cdot 10^{-2}.$$

Для грубой оценки можно принять

$$\sigma_{\text{сг1}}^2 = \frac{1}{\sigma_1^2} = \frac{1}{(10,147)^2} = 0,97 \cdot 10^{-2}.$$

Оценка других связей дает такие величины:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{сг2}}^2 &= 1,2 \cdot 10^{-5}; & \sigma_{\text{сг3}}^2 &= 6 \cdot 10^{-4}; & \sigma_{\text{сг4}}^2 &= 10^{-6}; \\ \sigma_{\text{гг2}}^2 &= 1,2 \cdot 10^{-7}; & \sigma_{\text{гг3}}^2 &= 10^{-6}; & \sigma_{\text{гг4}}^2 &= 10^{-11}. \end{aligned}$$

Величины связей достаточно малы, и их можно не принимать в расчет.

Ордена Ленина Институт физики Земли
АН СССР

ЛИТЕРАТУРА

- Архангельский В. Т., Дараган С. К. К вопросу о практическом использовании электромеханических фильтров в электродинамических сейсмографах с гальванометрической регистрацией. Тр. ИФЗ АН СССР, Изд. «Наука», № 35 (202).
- Архангельский В. Т., Дараган С. К. К вопросу об использовании

- электромеханических и конденсаторных фильтров в сейсмографах с гальванометрической регистрацией. Изв. АН СССР, серия геофизическая, № 10, 1965.
3. Борисевич Е. С., Иорданов Н. И., Розенберг И. М., Степанов В. В. Инженерно-сейсмический осциллограф ИСО—II. Сб. «Инженерная сейсмология», № 5; Тр. ИГИС АН Армянской ССР, 1965.
 4. Кирнос Д. П. Некоторые вопросы инструментальной сейсмологии. Тр. Геофизического института АН СССР, № 27 (154), 1955.
 5. Москвина А. Г., Шебалин Н. В. Применение сейсмографа с двумя гальванометрами для одновременной записи землетрясений на двух уровнях чувствительности. Изв. АН СССР, серия геофизическая, № 10, 1960.
 6. Рулев Б. Г. Сейсмоприемник С-5-С. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений. Изд. «Наука», 1966.
 7. Токмаков В. А. Формулы гальванометрической регистрации кинематических элементов колебательного движения. Аппаратура и методика сейсмометрических измерений. Изд. «Наука», 1967.